



Johann Wolfgang Goethe-Universität
Fachbereich Biologie und Informatik
Institut für Informatik

Diplomarbeit

Markerbasierte Erstellungswerkzeuge für komponentenbasierte Mixed Reality-Applikationen

von
Joachim Bienwald
1261877

29. September 2004

Eingereicht bei
Prof. Dr.-Ing. Detlef Krömker
Professur für graphische Datenverarbeitung

Betreut von
Dipl.-Wirtsch.-Inform. Daniel F. Abawi

Erklärung zur Diplomarbeit

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig durchgeführt und verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Frankfurt am Main, 29. September 2004

Joachim Bienwald

Zusammenfassung

In den Anwendungsbereichen der Mixed Reality (MR) werden die reale und die virtuelle Welt kombiniert, so dass ein Eindruck der Koexistenz beider Welten entsteht. Meist wird dabei die reale Umgebung durch virtuelle Objekte angereichert, die dem Anwender zusätzliche Informationen bieten sollen. Um die virtuellen Objekte richtig zu positionieren, muss die reale Umgebung erkannt werden. Diese Erkennung der realen Umgebung wird meist durch Bestimmung und Verfolgung von Orientierung und Positionierung der realen Objekte realisiert, was als Tracking bezeichnet wird und einen der wichtigsten Bestandteile für MR-Anwendung darstellt. Ohne die exakte Ausrichtung von realen und virtuellen Objekten, geht die Illusion verloren, dass die virtuellen Objekte Teil der realen Umgebung sind und mit ihr verschmelzen.

Das markerbasierte Tracking ist ein Verfahren, das die Bestimmung der Positionierung von realen Objekten durch zusätzliche Markierungen in der realen Umgebung ermöglicht. Diese Markierungen können besonders gut durch Bildanalyseverfahren extrahiert werden und bieten anhand ihrer speziellen Form Positionierungsinformationen. Der Einsatz dieser Trackingtechnologie ist dabei denkbar einfache und kostengünstig.

Ein breiter Anwendungsbereich ist durch den kostengünstigen Einsatz dieser Technologien gegeben, allerdings ist das Erstellen von MR-Anwendungen fast ausschließlich MR-Spezialisten vorbehalten, die über Programmierfertigkeiten und spezielle Kenntnisse aus dem MR-Bereich besitzen.

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung und Umsetzung der Konzepte, die einem Personenkreis, der lediglich über geringe Kenntnisse von MR-Technologien und deren Anwendung verfügt, den kostengünstigen und einfachen Einsatz von markerbasierten Trackingtechnologien ermöglicht. Die im Rahmen der Arbeit durchgeführte Analyse verweist auf die problematischen Anwendungsfälle des markerbasierten Trackings, die durch die Verdeckung von Markern zustande kommen, in der Beschränkung der Markeranzahl begründet sind, oder durch die Schwankung der Trackingangaben entstehen. Diese Problembereiche sind bei der Entwicklung berücksichtigt worden und können mit Hilfe der entwickelten Konzepte vom Autor bewältigt werden.

Das Konzept der Markerkategorien ermöglicht dabei den Einsatz von angepassten Filterungstechniken. Die redundante Markerkombination behebt das Verdeckungsproblem und eliminiert Schwankungen durch das Kombinieren von mehreren Trackinginformationen. Die Gütefunktion ermöglicht die Bewertung von Trackinginformationen und wird zur Gewichtung der Trackingangaben innerhalb einer Markerkombination genutzt. Das Konzept der Markertupel ermöglicht eine Wiederverwendung von Markern, durch den Ansatz der Bereichsunterteilung.

Die Konzepte sind in der AMIRE-Umgebung vollständig implementiert und getestet worden. Zum Abschluss ist rückblickend eine kritische Betrachtung der Arbeit, in punkto Vorgehensweise und erreichter Ergebnisse durchgeführt worden.



Markerkombination

Abstract

In Mixed Reality (MR) applications the real and the virtual world are combined, so that an impression of the coexistence of both worlds occurs.

For the most part of MR-technology, the real environment is enriched by virtual objects, which offer additional information to the user. The real environment must be recognized to correctly position the virtual objects. The real environment is usually recognised by identifying and tracking the orientation and position of real objects. Tracking is one of the most important components for MR-applications. If the virtual objects are not accurately aligned, the illusion of the coexistence is lost.

With the marker-based tracking the positioning of the real objects is recognized by additionally attached markings. These markings can be extracted especially well by image analysis procedures. The use of this technology is economically conceivable and simple.

A broad range of applications is possible by the economical use of these technologies. However developing MR-applications requires MR-specialists who have programming ability and special knowledge of MR-technology.

This work describes the development and implementation of the concepts, which makes it possible for a MR-layman to independently use the marker-based tracking technology.

A number of issues in marker-based tracking are covered in the report. Covering or markers, restriction in the number of markers and the fluctuation in tracking values are some of these issues.

The marker categorie concept makes use of adapted filtering techniques. The redundant marker combination eliminates the covering problem and also eliminates fluctuations by combining several tracking information. The accuracy function makes the evaluation of the tracking information possible and it is used for the weighting of the tracking values in the redundant marker combination. The marker tuple concept allows re-use of markers possible, by the use of range partitioning.

These concepts are fully implemented and tested in the AMIRE-authoring environment.

Finally, the work and the proceeding are critically reviewed, and the results of the experiments verified.



Markercombination

Aufgabenstellung

Unter Mixed Reality (MR) versteht man die Technologie, bei der reale Bilder (z. B. Videoaufnahmen oder Echtzeit-Kameraaufnahmen) mit computergenerierten Informationen angereichert werden (bspw. Annotationen, Animationen, Texte). Im Rahmen des internationalen EU-Forschungsprojekts AMIRE (Authoring Mixed Reality – <http://www.amire.net>) werden einzelne Werkzeuge, das ergänzende Gesamtsystem und Abläufe entwickelt bzw. spezifiziert, die die Erstellung von MR-Anwendungen maßgeblich vereinfachen und beschleunigen. Um eine genaue Überlagerung von virtuellen Objekten mit realen Objekten zu gewährleisten, wurden bereits einige bildorientierte Trackingsysteme entwickelt. Speziell die markerbasierten Trackingkonzepte sind in ihrer Umsetzung bzgl. der Zahl der verwendbaren Muster aufgrund von Aspekten wie Performance und Güte der Erkennung eingeschränkt. Aber gerade die Einbeziehung von (anscheinend) redundanten Quellen zur Positions- und Orientierungsbestimmung in Form von mehreren Markern stellt einen vielversprechenden Ansatz dar.

Ziel der Diplomarbeit ist es Konzepte zu entwickeln und (prototypisch) umzusetzen, die den Autoren einer MR-Applikation bei der (globalen) Wiederverwendung von bereits eingesetzten Markern unterstützen sollen bzw. ihm dabei Hilfestellungen anbieten, wie und wann mehrere Marker in einer MR-Szene verwendet werden sollten. Dabei sollen auch Verfahren untersucht und entwickelt werden, die aus mehreren (abweichenden) Positions- und Orientierungsangaben eine stabile und zuverlässige Bestimmung derselbigen Parameter erlauben.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mir während meines Studiums und speziell bei der Erstellung dieser Arbeit beiseite standen.

An erster Stelle soll mein Dank an Daniel F. Abawi gehen, für die Formulierung der Aufgabenstellung dieser Arbeit und für seine Anregungen und Hinweise während seiner Betreuung.

Bei Prof. Dr.-Ing. Detlef Krömker möchte ich mich speziell dafür bedanken, dass er mir diese Arbeit ermöglicht und auch die Ressourcen zur Verfügung gestellt hat.

Mein Dank gilt auch Inka Schweitzer und Thomas Spitz, die diese Arbeit Korrektur gelesen haben.

Außerdem möchte ich mich bei Elham Allahyari-Jam, Frank Bergmann, Martin Böss, Sönke Dirksen, André Miede, Michael Krauß und Björn Schmidt für die freundliche und aufmunternde Arbeitsatmosphäre bedanken.

Nicht zu letzt geht mein herzlichster Dank an meine ganze Familie. Insbesondere aber an meine Eltern, ohne deren Unterstützung mein Studium und diese Arbeit nicht möglich gewesen wären.

Frankfurt am Main, 29. September 2004

Joachim Bienwald

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xix
Tabellenverzeichnis	xxi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziele der Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Basistechnologie und Grundlagen	5
2.1 Einführung in Mixed Reality	5
2.1.1 Anwendungsbereiche	6
2.1.2 Mixed Reality Technologien	13
2.1.3 Registrierung und Tracking	18
2.2 Autorensysteme und Autorenwerkzeuge	20
3 Analyse und Vorüberlegung	21
3.1 Vorgehensweise der Analyse	21
3.2 Trackingtechnologien	22
3.2.1 Elektromechanisches Tracking	22
3.2.2 Tracking durch elektromagnetische Feldmessung	23
3.2.3 Magnetkompass	23
3.2.4 Inklinationskompass	24
3.2.5 Tracking durch Lauflängenmessungen	24
3.2.6 Tracking durch Trägheitssensoren	27
3.2.7 Bildorientiertes Tracking	28
3.2.8 Hybride Trackingsysteme	32
3.2.9 Bewertung der Trackingtechnologien	33
3.3 Anwendungsfälle und deren Auswirkungen auf das Tracking	33
3.3.1 Tracking in unpräparierten Umgebungen	35
3.3.2 Tracking über kleine Distanzen	35
3.3.3 Tracking über große Distanzen	35
3.3.4 Anwendungen mit großem Trackingbereich	35

3.3.5	Tracking in dynamischen Umgebungen	36
3.3.6	Tracking mit bewegter Kamera	37
3.3.7	Hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Trackinginformation	37
3.3.8	Zusammenfassung	38
3.4	Vorüberlegung zur Kombination von Trackingquellen	39
3.5	Vorüberlegung zur Wiederverwendung von Markern	42
3.6	Vorüberlegung zur Filterung von Trackinginformationen	44
3.7	Autorensysteme und Werkzeuge	47
3.8	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	52
4	Konzeption	53
4.1	Markerkategorien	53
4.1.1	Hilfestellung bei der Kategorisierung	57
4.2	Gütefunktion	58
4.3	Redundante Markerkombination	60
4.3.1	Automatisierte Markerauswahl	62
4.3.2	Interaktives Kombinieren von Markern	64
4.4	Markertupel als Trackinginformation	69
4.4.1	Verwaltung der Markertupel	70
4.4.2	Interaktives Anfordern von Markertupeln	71
4.5	Zusammenfassung	72
5	Realisierung	75
5.1	Markerkategorien	75
5.1.1	Filterung von Positions- und Orientierungsangaben	76
5.1.2	Hilfestellung bei der Kategorisierung von Markern	78
5.2	Gütefunktion	81
5.2.1	Messungen zur Gütefunktion	81
5.3	Redundante Markerkombination	92
5.3.1	Automatisierte Markerauswahl	94
5.3.2	Interaktives Kombinieren von Markern	95
5.4	Markertupel als Trackinginformation	103
5.4.1	Interaktives Anfordern von Markertupeln	103
5.4.2	Automatisierte Zuordnung von Trackinginformationen	104
6	Implementierung	107
6.1	Das AMIRE-Projekt	107
6.1.1	AMIRE-Architektur	109
6.1.2	AMIRE-Autorenumgebung	112
6.2	Architektur der Implementierung	113
6.2.1	Erweiterte Markerkomponente	116
6.2.2	Kategorisierungswerkzeug	117
6.2.3	Multimarkerkomponente	118

6.2.4	Bereichsmanager Komponente	121
6.3	Probleme und Limitationen	123
7	Evaluiierung	127
7.1	Vorgehensweise	127
7.2	Ergebnisse	129
8	Zusammenfassung und Ausblick	131
8.1	Zusammenfassung	131
8.2	Ausblick	133
A	Inhalt der beigefügten DVD	135
	Quellenverzeichnis	137

Abbildungsverzeichnis

2.1	Virtuality Kontinuum [MK94]	5
2.2	Beispiel für Augmented Reality [Azu97]	6
2.3	MEDARPA Projekt [MED04]	8
2.4	PISTE Projekt [PIS04]	8
2.5	METAVISION Projekt [MET04]	9
2.6	LIFEPLUS Projekt [LIF04]	10
2.7	ARCHEOGUIDE Projekt [ARC04]	11
2.8	CREATE Projekt [CRE04]	12
2.9	POWERSPACE Projekt [HR02]	13
2.10	DWARF Software Framework [DWA04]	14
2.11	„The Touring Machine“ des MARS Projektes [MAR04]	14
2.12	Autorenwerkzeuge des MARS Projektes [MAR04]	15
2.13	Anzeigekonzepte [Azu97]	17
2.14	Projektionsbasierte Anzeige [RA00]	18
2.15	Orientierung und Positionierung	19
3.1	Elektromechanisches Tracking	23
3.2	Cave	24
3.3	Inklinationskompass	25
3.4	Positionsbestimmung durch Lauflängenmessung	26
3.5	Ultraschall Lauflängenmessung [FHP98]	26
3.6	Das Gyroskop [GGG90]	27
3.7	Bildanalyse des bildorientierten Tracking (nach [AMI04a])	28
3.8	Marker mit konzentrischen Kreismustern [NYC ⁺ 99]	29
3.9	Markerbasiertes Tracking mit quadratischen Bildmustern [KBP ⁺ 00b]	29
3.10	Markerloses Tracking mit Referenzbildern [CCP02]	31
3.11	Tracking mit Referenzbildern und Korrelationsfunktion [Str01]	31
3.12	Markerloses Tracking ohne Referenzbilder [NYC ⁺ 99]	32
3.13	Trackingprobleme	36
3.14	Orbitinganwendung des Tracking	37
3.15	Markerkombinationen mit relativ statischer Ausrichtung	39
3.16	Rekonstruktion durch Offsetkombination	40
3.17	Lokales einheitliches Koordinatensystem	40

3.18	Einsatz von Markerfeldern [KB99, KBP ⁺ 00b]	41
3.19	Markerverdeckung bei mehreren Kameras [LRS02]	42
3.20	Symmetrischen Marker	43
3.21	Wiederverwendung von Markern durch Bereichsunterteilung	44
3.22	Kalman-Filterung	46
3.23	Autorenpyramide [AD04]	48
3.24	Erstellungsphasen [ADHZ04]	49
4.1	Schnittstelle beim Markertracking	55
4.2	Entscheidungsverlauf bei der Markerkategorisierung	57
4.3	Markerüberwachung	58
4.4	Tracking einer Markerkombination	62
4.5	Automatische Markerauswahl	63
4.6	Ablaufschema des Einfügens	66
4.7	Ablaufschema der Orbitingunterstützung	68
4.8	Positions- und Bereichsmarker	70
5.1	Rotationen	76
5.2	Schematischer Ablauf der Kategorisierung	79
5.3	Phasen der Kategorisierung	82
5.4	Messanordnung	83
5.5	Standardabweichung der Winkelmessung	85
5.6	Standardabweichung der Abstandsmessung	85
5.7	Systematischer Fehler der Winkelmessung	86
5.8	Systematischer Fehler der Abstandsmessung	86
5.9	Schwankungen bei der Winkelbestimmung	87
5.10	Schwankungen bei der Abstandsbestimmung	88
5.11	Visualisierung der Güteverteilung	91
5.12	Relativierung des Gütewertes	93
5.13	Visualisierung der Gütewerte	94
5.14	Optionsdialog der Markerkombination	95
5.15	GUI der Markerkombination	96
5.16	Videobilddarstellungen der Markerkombination	98
5.17	Videobilddarstellungen der Markerkombination	99
5.18	Orbitingwerkzeug	100
5.19	Orbitingwerkzeug	101
5.20	Orbitingwerkzeug	102
5.21	Dialogfenster des Markertupelwerkzeuges	104
5.22	Anzeige des aktuellen Bereichs	105
6.1	Autorenrollen [GHPR02]	108
6.2	AMIRE-Markertracking	110
6.3	AMIRE-Komponente [AMI04a]	111

6.4	AMIRE-Architektur [AMI04a]	112
6.5	Architektur der Komponenten	114
6.6	Klassendiagramme	115
6.7	Anwendungsbeispiel des Markerkategorisierungswerkzeug	118
6.8	Anwendungsbeispiel der Multimarkerkomponente	121
6.9	Anwendungsbeispiel des Bereichsmanagers	124

Tabellenverzeichnis

3.1	Vergleich der Trackingtechnologien	34
4.1	Zusammenfassung der Markerkategorien	56
6.1	Zuordnung der Markerkategorien	117

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Immer häufiger kommt man heutzutage mit virtuellen Realitäten in Kontakt. Teilweise erscheinen diese vom Computer berechneten Bilder so realistisch, dass sie von unserer realen Welt kaum noch zu unterscheiden sind. Neben der Nachahmung der realen Welt wird jedoch auch versucht, die reale Welt durch Daten und Informationen zu bereichern, oder sogar die virtuelle mit der realen Welt zu kombinieren. Was hierbei entsteht wird als Mixed Reality (engl. gemischte Realität; MR) bezeichnet und stellt ein aktuelles Forschungsgebiet in verschiedensten Anwendungsbereichen dar.

Im Fernsehen werden beispielsweise bei Fußballübertragungen virtuelle Entfernungsangaben eingeblendet, und beim American Football wird die First Down Linie virtuell nachgebildet, wobei der Zuschauer sofort erkennen kann, ob der Vorstoß der angreifenden Mannschaft ausgereicht hat oder nicht.

Der Fortschritt im technologischen Bereich, beispielsweise in der Entwicklung von leistungsfähigeren mobilen Rechnern, die dann auch mit Digitalkameras ausgestattet werden können, ist unaufhaltsam und ermöglichen den MR-Einsatz nicht nur bei Fernsehübertragungen, sondern auch auf dem Gebiet der Medizin. Sogar bis hin zum Heimwunder, der mit seiner Spielekonsole und einer kleinen Videokamera, virtuelle Bälle wegschlägt.

In den meisten MR-Anwendungen steht dabei die Erweiterung der realen Welt mit virtuellen Objekten im Mittelpunkt, die dann zusätzliche Informationen bieten sollen. Diese virtuellen Objekte müssen dann in die reale Szene integriert werden, wozu die reale Umgebung erkannt werden muss, um die virtuellen Darstellungen an den richtigen Positionen erscheinen zu lassen. Diese Erkennung der realen Umgebung wird meist durch Bestimmung und Verfolgung von Orientierung und Positionierung der realen Objekte realisiert, was als Tracking bezeichnet wird, und einen der wichtigsten Bestandteile für MR-Anwendung darstellt. Ohne die exakte Ausrichtung realer und virtueller Objekte, geht die Illusion verloren, dass die virtuellen Objekte Teil der realen Umgebung sind und damit verschmelzen.

Gerade die Trackingverfahren, die mit zusätzlich angebrachten Markierungen in der realen Umgebung arbeiten, ermöglichen die Bestimmung der Position in MR-Anwen-

dungen durch einfache und günstige Technologien. Handelsübliche Digitalkameras oder Webcams können zur Bilderfassung verwendet werden, und die Marker können mit Bildbearbeitungsprogrammen am Computer erstellt und ausgedruckt werden.

Das markerbasierte Tracking birgt allerdings auch Probleme in sich. Schließlich können Markierungen von der Kamera nicht erfasst werden, wenn sie sich außerhalb des Sichtfeldes der Kamera bewegen, oder durch andere Gegenstände verdeckt werden. Geringe Schwankungen in der Bilderfassung der Kamera führen zu Schwankungen der Positionsangaben und somit auch zu Unregelmäßigkeiten bei der Ausrichtung der virtuellen Objekte. In manchen Anwendungen kommt eine Vielzahl von Markern zum Einsatz, die dann auch alle unter widrigen Umständen im Videobild unterscheidbar sein müssen. Die Markierungen müssen eine eindeutige Identifizierung ermöglichen, damit keine Verwechslungen beim Tracking stattfinden.

Die einfachen und günstigen Voraussetzungen des markerbasierten Tracking fordern nahezu, Lösungen in dessen Problembereichen zu entwickeln, um diese Technologie auch in weiteren Anwendungen einsetzen zu können.

Trotz der einfachen Voraussetzungen für das markerbasierte Tracking, ist das Erstellen von MR-Anwendungen sehr kompliziert und setzt eine gute Kenntnis der Technologie und meistens auch Programmierfertigkeiten voraus. Dabei gibt es auch in anderen Bereichen der Computertechnologie Ansätze, die die Erstellung von Anwendungen auch einem Personenkreis ermöglicht, der lediglich über geringe Technologiekenntnisse und Programmierfertigkeiten verfügt. Solche Autorensysteme oder Autorenwerkzeuge vereinfachen den Erstellungsprozess und bieten Lösungen an, mit denen auch Laien arbeiten können. Die Autorenwerkzeuge unterstützen den Autor bei der Handhabung der komplexen Technologien und ermöglichen ihm dadurch erst die Erstellung der Anwendungen. Doch gerade die Autorenunterstützung im MR-Bereich ist noch wenig entwickelt und bietet somit Ansatzpunkte, die eine Verbreitung der MR-Technologien beschleunigen würde.

Speziell Ansätze im Bereich der komponentenbasierten Softwareentwicklung ermöglichen auch einen effizienteren und kostengünstigeren Erstellungsprozess, bei dem die Wiederverwendung von Anwendungsbausteinen einen zentralen Bestandteil darstellt. Bestehende Halbfabrikate können vom Autor leicht der Anwendung angepasst werden und können somit auch in unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt werden. Dabei kapseln solche Halbfabrikate meist auch komplexe Funktionen, die dem Autor dann in einfacher Form zur Verfügung gestellt werden.

Für die Erstellung von MR-Anwendungen gibt es Systeme die den komponentenbasierten Ansatz verfolgen. Es stehen auch erste Entwicklungen bereit, die den Autor bei der Erstellung von MR-Anwendungen unterstützen. Doch gerade die Problembereiche des markerbasierten Tracking, die auch dem Autor Schwierigkeiten beim Einsatz der Trackingtechnologie bereiten, werden dabei unzureichend berücksichtigt.

1.2 Ziele der Arbeit

Diese Arbeit widmet sich dem markerbasierten Tracking, dessen Einsatzmöglichkeiten durch die einfache und kostengünstige Technologie viel versprechend sind. Sie zielt zudem auf einen Personenkreis ab, der lediglich über geringe Kenntnisse im Bereich der MR-Technologien und dessen Methoden verfügt. Durch die Entwicklung und Umsetzung geeigneter Konzepte soll es speziell solchen Autoren ermöglicht werden, das markerbasierte Tracking in MR-Anwendungen zum Einsatz zu bringen, wobei die problematischen Anwendungsfälle dieser Technologie berücksichtigt werden müssen.

Das markerbasierte Tracking soll aus diesem Grund auf die Anwendbarkeit in unterschiedlichen Anwendungsfällen überprüft werden, um zum einen dessen breite Einsatzmöglichkeiten zu belegen, und zum anderen dessen Problembereiche zu erkennen. Die Entwicklung und Umsetzung von Konzepten, die auf der einen Seite diese Problembereiche des markerbasierten Tracking beheben, und auf der anderen Seite durch einfache Mittel zum Einsatz gebracht werden können, stehen im Mittelpunkt dieser Arbeit. Neben den theoretischen Ansätzen soll auch die praktische Realisierung gezeigt werden, wobei beides, Konzeption und Realisierung, rückblickend kritisch betrachtet werden soll, im Hinblick auf die gewählte Vorgehensweise und die erzielten Ergebnisse.

Die kostengünstigen und einfachen Voraussetzungen des markerbasierten Tracking würden durch solche Konzepte die Einsatzmöglichkeiten dieser Trackingtechnologie erweitern und damit auch zu einer allgemein breiteren Anwendbarkeit von MR-Technologien beitragen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die Gliederung der Arbeit, mit kurzer Erläuterung zu den einzelnen Kapiteln.

Kapitel 2 bietet eine kurze Einleitung in den Themenbereich dieser Arbeit. Dazu wird eine Definition des Begriffs „Mixed Reality“ und ein Einblick in deren Anwendungsgebiete gegeben. Es werden Technologien aus dem Bereich der „Mixed Reality“ betrachtet, wobei speziell auf die Registrierung und das Tracking eingegangen wird. Außerdem werden anhand eines Beispiels die Begriffe der Autorensystem und Autorenwerkzeug erklärt und deren Einsatzgründe motiviert.

Kapitel 3 schafft die Voraussetzungen für die Entwicklung der Konzepte. Dazu werden verschiedene Trackingtechnologien betrachtet, und deren Vor- und Nachteile beleuchtet, um die Wahl der markerbasierten Trackingtechnologie zu bestärken. Ein weiterer Schwerpunkt des Kapitels ist die Betrachtung der Voraussetzungen für die Entwicklung von Autorenwerkzeugen, aufgrund deren auch eine Wahl des Autorensystems getroffen wird, das in der späteren Implementierung zum Einsatz kommt.

Kapitel 4 entwickelt aufbauend auf der Analyse des vorhergehenden Kapitels, die Konzepte, mit deren Hilfe die Entwicklung von Autorenwerkzeugen für das Anwenden von Filtertechniken, die redundante Markerkombination und die Wiederverwendung von Markern, ermöglicht werden, die sich in der Analyse als Lösungsansätze des markerbasierten Tracking herausgestellt haben.

Kapitel 5 beschreibt eine Umsetzung der vorgestellten Konzepte aus dem vorhergehenden Kapitel. Dabei wird gezeigt, wie die einzelnen Konzepte, der Kategorisierung von Markern, der redundanten Markerkombination und der Wiederverwendung von Markern, durch Markertupel und die entsprechenden Autorenwerkzeuge aussehen können.

Kapitel 6 beschreibt die spezielle Implementierung der entwickelten Konzepte in der AMIRE-Autorenumgebung. Dazu wird eine Einleitung in die AMIRE-Architektur gegeben, um darauf aufbauend die Beschreibung der implementierten Komponenten durchführen zu können.

Kapitel 7 stellt rückblickend eine kritische Betrachtung der Vorgehensweise und der Ergebnisse der Arbeit dar.

Kapitel 8 fasst zum Abschluss die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit nochmals zusammen und bietet einen Ausblick auf mögliche Erweiterungen und Wiederverwendungsmöglichkeiten der entwickelten Konzepte.

Kapitel 2

Basistechnologie und Grundlagen

Dieses Kapitel bietet eine kurze Einleitung in die Thematik der Arbeit. Es richtet sich dabei an die Leser der Arbeit, die mit den Themengebieten der „Mixed Reality“ wenig vertraut sind. Zu diesem Zweck wird eine Einführung und Definition des Begriffs „Mixed Reality“ durchgeführt. Ein Einblick in die zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten wird durch die Betrachtung von verschiedenen „Mixed Reality“-Projekten gegeben. Darauf folgend werden spezielle Technologien aus dem Bereich der „Mixed Reality“ betrachtet, wobei speziell auf die Registrierung und das Tracking eingegangen wird.

Daraufhin werden die Begriffe des Autorensystemes und des Autorenwerkzeuges erläutert und auf deren Einsatzbereiche, die gerade im Bereich der „Mixed Reality“ vielversprechend scheinen, hingewiesen.

2.1 Einführung in Mixed Reality

Unter dem Begriff der Virtual Reality (im folgenden als VR bezeichnet) werden Techniken verstanden, die es erlauben, einen Menschen unmittelbar in eine computergenerierte künstliche Welt zu integrieren und dabei mehrere Sinne des Menschen gleichzeitig anzusprechen [ABF⁺94]. Die Berücksichtigung der menschlichen Wahrnehmung und der Sinne hat dabei das Ziel der Immersion, womit das Gefühl des Eintauchens und das Gefühl des Einsseins mit der virtuellen Welt zu verstehen ist.

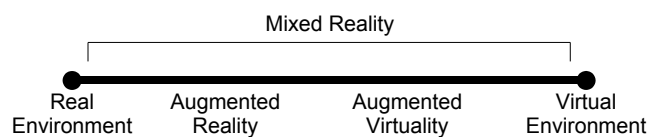
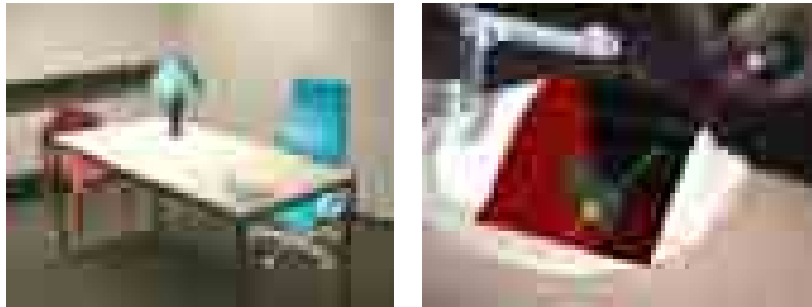


Abbildung 2.1: Virtuality Kontinuum [MK94]

Milgram und Kishino [MK94] definieren den Begriff der Mixed Reality (im folgenden als MR bezeichnet), mithilfe des Reality-Virtuality Kontinuums, dass in [Abbildung 2.1](#) dargestellt ist. Dabei steht der linke Rand des Kontinuums für die Realität, die ausschließlich aus real existierenden Objekten besteht (wie beispielsweise bei einer Filmaufnahme), und der rechte Rand für die Virtualität, die ausschließlich aus computergenerierten virtuellen Objekten besteht (wie sie beispielsweise in Computerspielen



(a) Realer Tisch mit virtuellen Stühlen und Tischlampe

(b) Gewebeentnahme bei einem potenziellen Brusttumor

Abbildung 2.2: Anwendungsbeispiel für Augmented Reality [Azu97]

vorkommen). Im MR-Bereich werden Elemente der realen Umgebung und der virtuellen Umgebung gemischt, worunter dann auch der Bereich der Augmented Reality (im folgenden als AR bezeichnet) fällt, in dem reale Umgebungen mit virtuellen Objekten angereichert¹ werden (siehe [Abbildung 2.2\(a\)](#)), aber auch der Bereich der Augmented Virtuality (im folgenden als AV bezeichnet), in dem die virtuelle Welt mit Objekten der realen ergänzt wird.

2.1.1 Anwendungsbereiche

Die Einsatzmöglichkeiten von MR-Anwendungen sind vielfältig und können an dieser Stelle nicht vollständig betrachtet werden. Es soll trotzdem ein Einblick in einige Anwendungsgebiete gegeben werden, um die Vielfältigkeit der Einsatzmöglichkeiten von MR-Anwendungen und deren Nutzen aufzuzeigen. Aus diesem Grund werden an dieser Stelle einige MR-Projekte vorgestellt, die in verschiedenen Bereichen angesiedelt sind. Darunter fallen die Bereiche des technischen Service und Wartung, der Bereich der Medizin und der Bereich der Film und Fernsehübertragung.

Projekte im Bereich Technischer Service und Wartung

Im BMB+F (Bundesministerium für Bildung und Forschung) Leitprojekt ARVIKA [[ARV04](#)], das von Friedrich [[Fri00](#)] beschrieben wird, werden MR-Technologien zur Unterstützung von Arbeitsprozessen in Entwicklung, Produktion und Service für komplexe technische Produkte und Anlagen, benutzerorientiert und anwendungsgetrieben erforscht und realisiert. Durch die visuelle Überlagerung realer Objekte mit rechnergenerierten virtuellen Objekten wird ein situationsgerechtes Agieren in realen Arbeitsumgebungen angestrebt. Ziel des Projektes ist die Erforschung und Entwicklung einer marktgerechten Unterstützung von produkt-, fertigungs- und serviceorientierten

¹Man spricht dann auch vom *Augmentieren* virtueller Objekte

Informations- und Kommunikationstechnologien, für Facharbeiter, Techniker und Ingenieure, in Anwendungsfeldern des Automobil- und Flugzeugbaus, sowie des Maschinen- und Anlagenbaus.

Das STARMATE Projekt (System using Augmented Reality for Maintenance, Assembly, Training and Education) [STA04b] richtet den Schwerpunkt auf die Spezifikation, das Design, und die Entwicklung eines computergeleiteten Systems, zur Instandhaltung von komplexen mechanischen Elementen. Dabei kommen MR-Technologien zum Einsatz, die direkten Zugriff auf verfügbare Dokumentationen und Handbücher für die jeweilige Arbeitsumgebung bieten. Visuelle und auditive Informationen werden zur Unterstützung des Arbeitsprozesses angeboten, die auch über Spracheingabe oder Zeigergeräte (pointing devices) kontrolliert werden können.

Das STAR Projekt (Service Training through Augmented Reality) [STA04a] ist fokussiert auf die Entwicklung von AR-Techniken im industriellen Einsatz, für die Schulung von Fachleuten, für Online-Dokumentation und für Planungsaufgaben.

Projekte im Bereich der Medizin

Das Anwendungsgebiet beim MEDARPA Projekt (Medical Augmented Reality for Patients) [MED04] beschränkt sich auf den medizinischen Bereich. Die Zielsetzung des Medarpa Projektes besteht darin, die Durchführung von operativen Eingriffen und deren Methoden durch den Einsatz von AR-Technologien zu unterstützen. Die fehlende visuelle Information (z.B. bei der minimal invasiven Chirurgie, aber auch zusätzliche Informationen durch Röntgenbilder, oder Bildinformationen der Computertomographie) sollen dem Arzt zur Verfügung gestellt werden, ohne dabei durch komplizierte technische Geräte oder Aufbauten zu behindern (siehe [Abbildung 2.3](#)). Somit kann der Arzt während der Operation quasi in den Patienten hineinblicken, ohne dabei seinen Blick von der Operationsstelle abwenden zu müssen. Die Bereitstellung dieser Zusatzinformation erfolgt auf einem frei-positionierbaren, halbtransparenten Display und kann von dem Arzt je nach Behandlungssituation optional verwendet werden.

VRSUR (Virtual Reality Surgery Training System) [VRS04] konzentriert sich auf den Trainingseinsatz in der Chirurgie, speziell in der Oberkiefer-Gesichtschirurgie. Zu diesem Zweck wurden VR-Trainingssimulationen entwickelt, in denen mit realen Operationsgeräten gearbeitet werden kann, die dann auch eine Kraftübertragung beim virtuellen Eingriff ermöglichen.

Projekte im Bereich von Film und Fernsehübertragung

Im PISTE Projekt (Personalized Immersive Sports TV Experience) [PIS04] wird ein MR-Konzept für interaktives Sportfernsehen präsentiert, das Werkzeuge für die Erzeugung der Inhalte, auf Senderseite, und Interaktionsmöglichkeiten auf Zuschauerseite

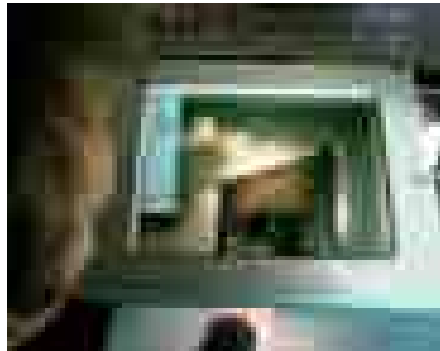


Abbildung 2.3: MEDARPA Projekt [[MED04](#)]



Abbildung 2.4: PISTE Projekt [[PIS04](#)]

zur Verfügung stellt. [Abbildung 2.4](#) zeigt den Arbeitsablauf eines vereinfachten Anwendungsbeispiels.

Das METAVISION Projekt [[MET04](#)] strebt einen komplett elektronischen Produktionsablauf, im Bereich der hochauflösenden Filmaufnahme, Filmbearbeitung, Speicherung und Verbreitung an. Dazu wurden verlustfreie Kompressionsverfahren und spezielle Aufnahmetechniken betrachtet, die auch Tiefeninformationen erzeugen (siehe [Abbildung 2.5](#)), die in der Post-Produktion ausgenutzt werden können, um Bildinformation nachträglich zu mischen.

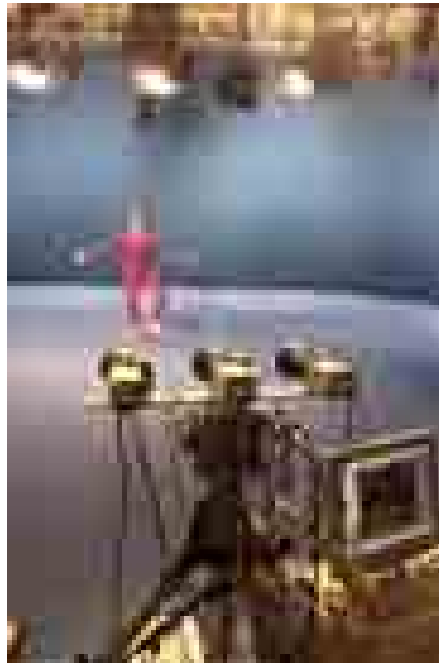


Abbildung 2.5: METAVISION Projekt [MET04]

Projekte aus dem Bereich der Kunst und Kultur

Das LIFEPLUS Projekt [LIF04] beschäftigt sich mit der Belebung von antiken Fresken und Zeichnungen, durch Erschaffung immersiver², erzählender fiktionaler Räume (narrative design of fictional spaces), die ähnlich einer realen antiken Szenerie, realistische Simulationen von virtuellen Menschen, Tier- und Pflanzenwelten bietet. Im Mittelpunkt steht das realistische virtuelle Leben in AR-Umgebungen, das in Verbindung mit einer Besucher-Anwendung, die durch automatisches Kameratracking, bei der Verwendung von See-Through HMD (Head-Mounted Displays) in unbekannten Umgebungen, realisiert wird.

Das ART.LIVE Projekt (ARchitecture and authoring Tools prototype for Living Images and new Video Experiments) [ART04] beschäftigt sich mit der Entwicklung von Autorenwerkzeugen zur einfachen Erstellung von MR-Anwendungen und „Virtual Narrative Spaces“ Umgebungen, die mittels Echtzeitübertragung im Internet oder über andere Netzwerke verbreitet werden können.

Das ARCHEOGUIDE Projekt (Augmented Reality-based Cultural Heritage On-site Guide) [ARC04], das von Vlahakis et al. [VKT⁺01] beschrieben wird, zielt auf die Entwicklung eines mobilen AR-Systems ab, das dem Besucher einer historischen Stätte,

²Das Gefühl des Eintauchens und Einsseins mit der virtuellen Welt

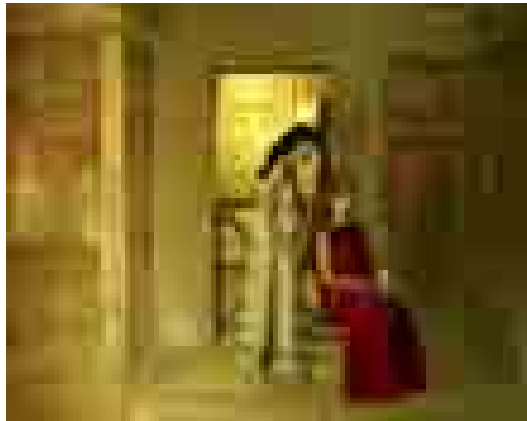


Abbildung 2.6: LIFEPLUS Projekt [LIF04]

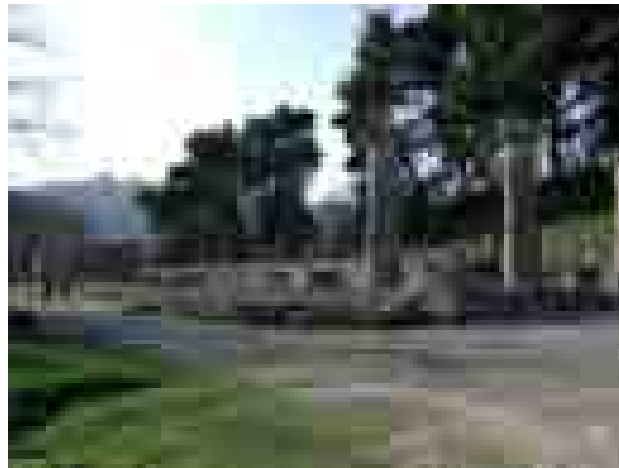
eine computergenerierte Rekonstruktion mit Zusatzinformationen, in Abhängigkeit von seiner Position darbietet (siehe [Abbildung 2.7](#)). Spezielle Aufgabengebiete liegen dabei in der 3D-Visualisierung mit mobilen Einheiten, verschiedenartigen Interaktionsmöglichkeiten, benutzerfreundlichen Schnittstellen und Outdoor-Tracking.

Im CHARISMATIC [CHA04] Projekt steht der intelligente virtuelle Avatar im Mittelpunkt, der einen Anwender durch virtuelle kulturelle Welten begleitet und speziell mit dem Anwender über die natürliche Sprache und Gestik kommuniziert und somit eine angepasste Schnittstelle, zum Computer, für den Anwender darstellt.

Projekte aus weiteren Bereichen

Das Ziel des INTERFACE Projektes [INT04] ist die Entwicklung von neuen Modellen und erweiterten Werkzeugen, für großräumige MR-Umgebungen. Im Vordergrund steht dabei die Interaktion zwischen Mensch und Maschine, mit Hilfe von Audio-Video Analyse, Synthese und Repräsentation. Der Schwerpunkt bei der Mensch-Maschineninteraktion, liegt bei Interpretation und Analyse der natürlichen Sprache, Gesichtsausdrücken und Körpergesten des Anwenders, die eine Interaktion von Mensch zur Maschine ermöglichen soll. Umgekehrt soll die Maschine Informationen mittels menschenähnlicher Audio-Videoschnittstelle bieten, um die Kommunikation aus Sicht des Menschen zu vereinfachen.

Das CREATE Projekt (Constructivist Mixed Reality for design, education, and cultural heritage) [CRE04], beschrieben von Loscos et al. [LWR⁺03], siedelt sich im Bereich der AV-Anwendungen an. Der zentrale Punkt des Projektes ist die fotorealistische und detaillierte 3D-Rekonstruktionen aus realen Datenquellen, wie beispielsweise Bild- und Tonaufnahmen und Vermessungsergebnissen der realen Umgebung (siehe



(a) Reale Sicht auf eine antike Ruine



(b) Augmentierung der virtuellen Rekonstruktion

Abbildung 2.7: ARCHEOGUIDE Projekt [[ARC04](#)]

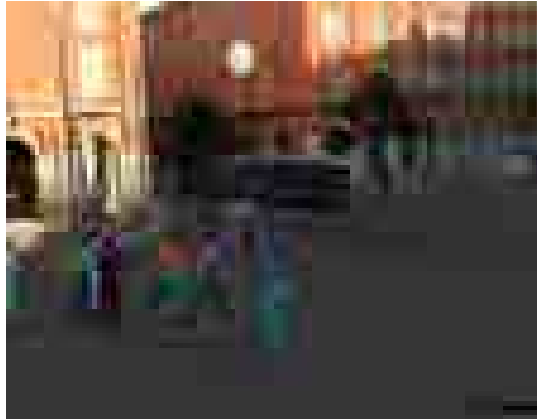


Abbildung 2.8: CREATE Projekt [CRE04]

Abbildung 2.8). Zum Einsatz kommen dabei auch spezielle Darstellungen der Vegetation, von animierten Menschenmengen und Fahrzeugen, die trotz komplexer Geometrien (beispielsweise von Bäumen) eine Echtzeitdarstellung ermöglichen. Im Vergleich zu Vorgängerprojekten ermöglicht CREATE (laut Loscos et al. [LWR⁺03]) einen hohen Grad an Interaktion und stellt dafür auch eine Schnittstelle zum Anwender zur Verfügung, die dessen Tastsinne anspricht. Durch den Einsatz einer hohen Anzahl von Geräuschquellen, die eine spezielle Verarbeitung benötigt, wird eine realistische Geräuschkulisse ermöglicht.

Haringer und Regenbrecht [HR02] beschreiben das AR-Autorensystem POWERSPACE, das eine einfache Erstellung von AR-Welten ermöglicht. Dazu wird der Erstellungsprozess in verschiedene Schritte unterteilt, in denen verschiedene Werkzeuge zum Einsatz kommen. Zur Erstellung des 3D-Inhalts wird dazu das 2D Präsentationsprogramm „Microsoft PowerPoint“ eingesetzt, mit dem die virtuellen Geometrien und Annotationen definiert werden, die in der Anwendung zum Einsatz kommen (siehe Abbildung 2.9(a)). Im zweiten Schritt wird, mit dem 3D PowerSpace Editor, die XML-basierte PowerPoint Exportdatei bearbeitet, um räumliche Anpassung und Ausrichtung durchzuführen (siehe Abbildung 2.9(b)). Der letzte Schritt besteht in der Evaluierung des Ergebnisses mithilfe des PowerSpace Viewers Abbildung 2.9(c)).

DWARF (Distributed Wearable Augmented Reality Framework) [DWA04] ist ein komponentenbasiertes AR-Software Framework, das an der Technischen Universität München entwickelt wurde und dessen Aufbau von Bauer et al. [BBK⁺01] beschrieben wird. Dabei wurde ein komponentenbasierter Ansatz gewählt, um die Wiederverwendung von Komponenten in neuen Anwendungen zu ermöglichen. Bauer et al. schildern die Anwendung eines AR-Navigationssystems, das auf dem DWARF Framework aufbaut und die Einsatzmöglichkeit des Systems im Indoor und Outdoor Bereich zeigt, durch

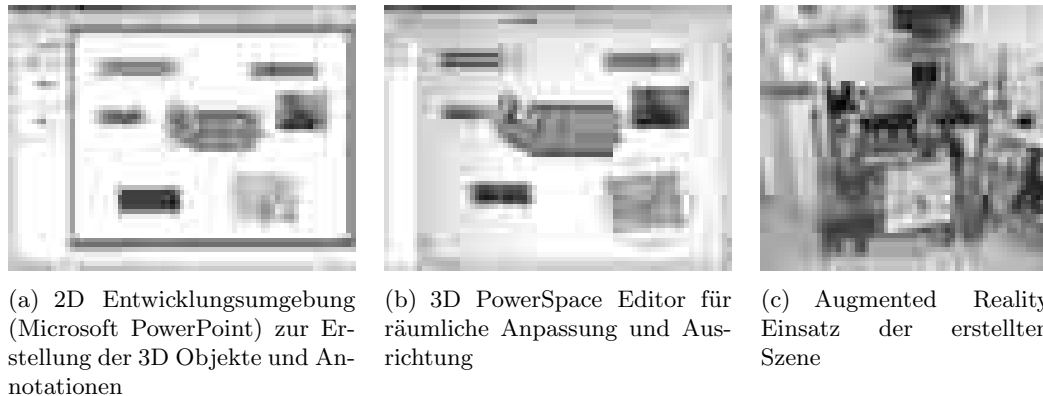


Abbildung 2.9: POWERSPACE Projekt [HR02]

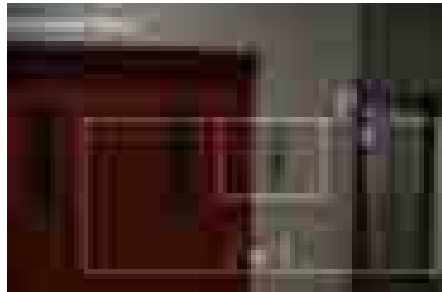
die Kombination verschiedener Trackingtechnologien. Im STARS Projekt [STA04c], das von Klinker et al. [KCD⁺01] dargestellt wird, wird auf dem DWARF Framework aufgebaut, um Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten in einem Atomkraftwerk durch den Einsatz einer AR-Anwendung zu vereinfachen (siehe Abbildung 2.10).

Im MARS Projekt (Mobile Augmented Reality Systems) [MAR04] des „Computer Graphics and User Interfaces Lab“ der Columbia University, steht der Bereich der mobilen AR-Anwendungen im Mittelpunkt, wie von Höller et al. [HFT⁺99] dokumentiert. Das AR-Navigationssystem „The Touring Machine“, beschrieben von Feiner et al. [FMHW97], zeigt eine Anwendung des Projektes im Indoor und Outdoor Bereich (siehe Abbildung 2.11). Durch die „Mobile Journalist’s Workstation“ wird der Einsatz erweiterter Klang-, Text-, Bild- und Videoinhalte in der Touring Machine ermöglicht. Im MARS Projekt wurde für die Navigationsanwendung eine Benutzerschnittstelle für Indoor/Outdoor Kollaboration entwickelt (siehe Abbildung 2.11), bei dem der Anwender des Navigationssystems direkte Hilfe von weiteren Anwendern bekommen kann. Diese Hilfestellung wird auf verschiedenen Systemen ermöglicht (siehe Abbildung 2.12).

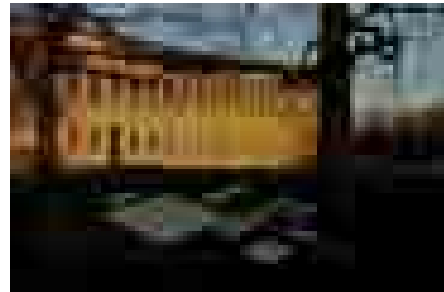
2.1.2 Mixed Reality Technologien

MR-Anwendungen werden erst durch den Einsatz verschiedener Technologien zur Darstellung und zur Interaktion ermöglicht. Teilweise kommen diese Technologien aus dem Bereich der VR, es kommen aber auch speziell für MR-Anwendungen entwickelte Technologien zum Einsatz.

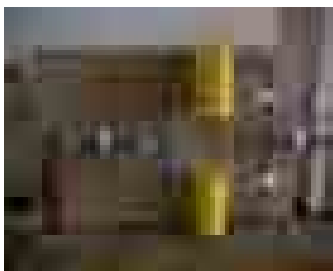
Hauptbestandteil von MR-Anwendungen ist das Mischen der Realitäten, das mit Hilfe verschiedenster Anzeigegeräte geschehen kann. Schon für VR-Anwendungen wurden Head Mounted Displays (HMD), bzw. Head Worn Displays (HWD) entwickelt, bei denen das Anzeigegerät am Kopf des Anwenders befestigt ist und die Darstellung direkt



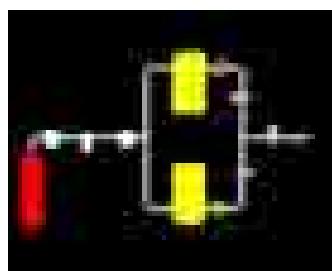
(a) Indoor Navigation



(b) Outdoor Navigation



(c) Reale Ansicht



(d) Virtuelles Model



(e) Augmentierte Ansicht

Abbildung 2.10: DWARF Software Framework in einer Navigationsanwendung und bei der Anwendung im STARS Projekt [\[DWA04\]](#)

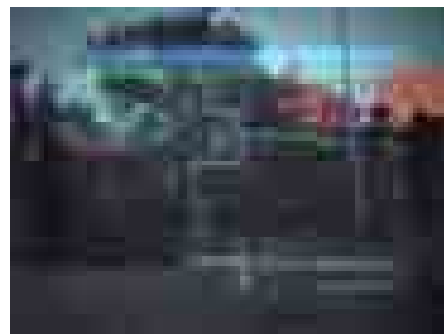
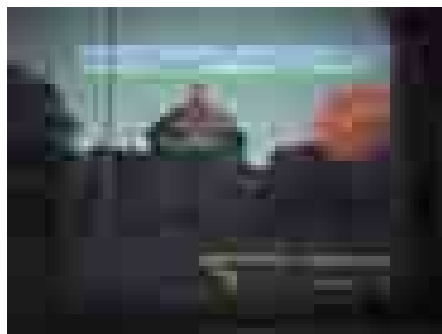
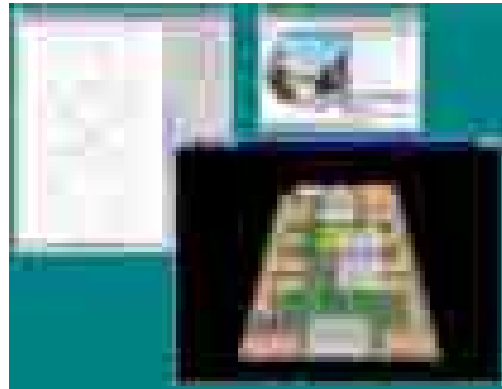


Abbildung 2.11: Navigationssystem „The Touring Machine“ des MARS Projektes [\[MAR04\]](#)



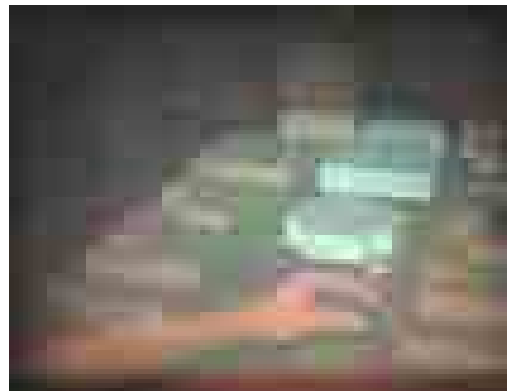
(a) Werkzeug für den Offline-Betrieb



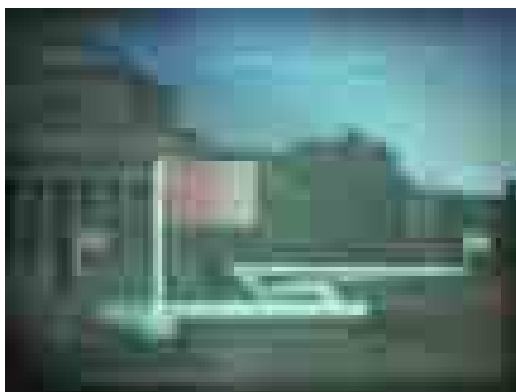
(b) Kollaborationswerkzeug in einer 2D-Umgebung



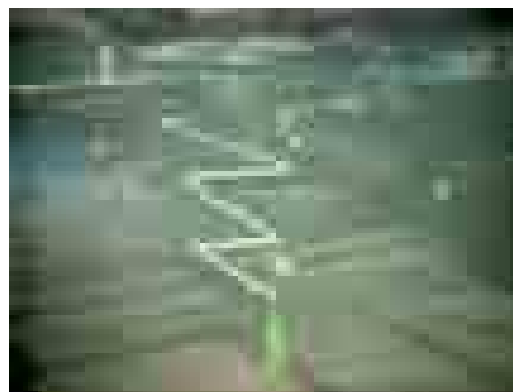
(c) 3D-Umgebung



(d) Virtual Desktop Umgebung



(e) Anwendersicht



(f) Anwendersicht

Abbildung 2.12: Autorenwerkzeuge des MARS Projektes [[MAR04](#)]

vor dessen Augen erzeugt wird. Es gibt so genannte Video See Through HMDs [Azu97], die die Sicht des Anwenders vollständig ersetzen, in dem die von einer oder zwei am Kopf befestigten Videokameras aufgenommen Bilder, über direkt vor den Augen platzierten Videoanzeigeräten dargestellt werden. Der prinzipielle Aufbau der Video See Through HMDs wird in [Abbildung 2.13\(b\)](#) dargestellt.

Optical See Through HMDs [Azu97], ersetzen die Sicht des Anwenders nicht, sondern ergänzen die Sicht des Anwenders über eine teiltransparente reflektierende Projektionsfläche. Dabei wird einerseits durch die Teiltransparenz die Sicht auf die reale Umgebung ermöglicht und andererseits durch die Reflexionseigenschaften, die zusätzliche Darstellung von virtuellen Objekten in die Sicht des Anwenders ermöglicht. Der Aufbau der Optical See Through HMDs wird in [Abbildung 2.13\(a\)](#) dargestellt.

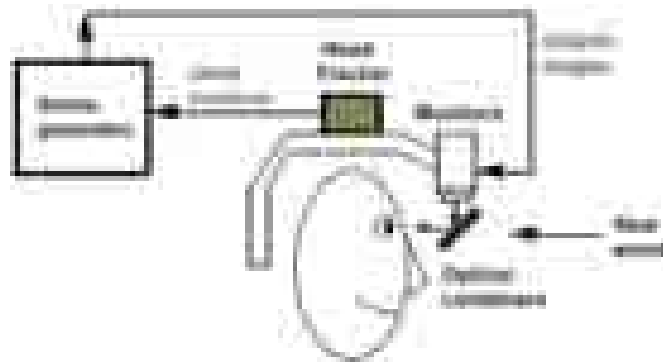
Weitere Anzeigetechnologien nutzen die Einsatzmöglichkeiten von gängigen Monitorgeräten und Videokameras oder Webcams. Bei dieser Art der monitorbasierten Darstellung wird die reale Umgebung über die Videokamera erfasst und im Rechner mit der virtuellen Welt kombiniert, um dann die Kombination über den Monitor darstellen zu können. Dabei können Shutterbrillen verwendet werden, bei denen die binokulare³ Tiefenwahrnehmung, über zeitliche Trennung der Bildinformationen für das linke und rechte Auge, ermöglicht wird. Der Aufbau der monitorbasierten Darstellung wird schematisch in [Abbildung 2.13\(a\)](#) gezeigt.

Bei projektionsbasierten Anzeigetechnologien werden keine zusätzlichen Anzeigemedien verwendet, wie beispielsweise Monitorgeräte oder teiltransparente Projektionsflächen. Die virtuellen Objekte werden stattdessen direkt in die reale Umgebung projiziert. [Abbildung 2.14](#) zeigt eine Anwendungsmöglichkeit der projektionsbasierten Anzeige, bei der MR-gestützten Zusammenarbeit an einem Arbeitstisch, der gleichzeitig als Projektionsfläche für virtuelle Arbeitsgegenstände dient.

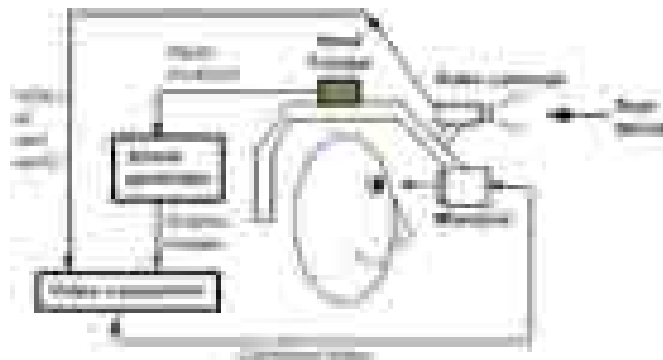
Damit die Grenzen zwischen den virtuellen und realen Objekten in der Wahrnehmung des Anwenders aufgehoben werden, sollten in MR-Anwendungen auch weitere Sinne des Menschen angesprochen werden, damit keine widersprüchlichen Eindrücke der verschiedenen Sinne auftreten. Beispielsweise kann die visuelle Darstellung eines virtuellen Objektes in einer Anwendung noch so realistisch sein, es wird trotzdem als störend wahrgenommen, wenn der Anwender die virtuellen Objekte, im Gegensatz zu den realen, nicht mit seinem Tastsinn erfassen kann.

Bei MR-gestützten medizinischen Trainingsanwendungen (wie beim VRSUR Projekt [VRS04] vorgestellt), ist das Ansprechen des Tastsinns des Anwenders nötig, um beispielsweise beim Setzen von Injektionen das Durchstechen von unterschiedlichen Gewebearten spürbar zu machen, wodurch erst ein realistischer Eindruck beim Training entsteht.

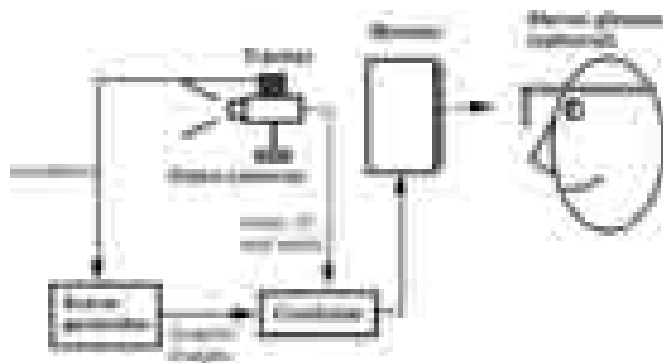
³bezieht sich auf das beidäugige Sehen



(a) Optical see-through



(b) Video see-through



(c) Monitorbasiert

Abbildung 2.13: Anzeigekonzepte [[Azu97](#)]

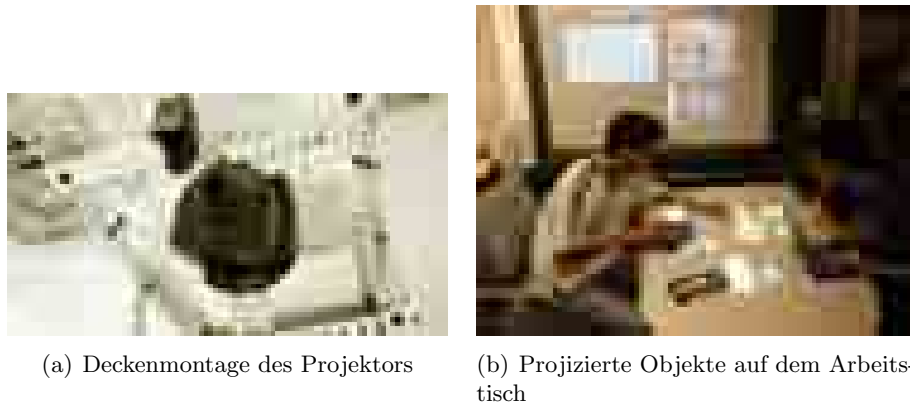


Abbildung 2.14: Beispiel einer projektionsbasierten Anzeige [RA00]

2.1.3 Registrierung und Tracking

Beim Mischen der Realitäten kann einerseits auf bewährte Technologien und Methoden der VR zurückgegriffen werden, wie beispielsweise auf Renderingmethoden zur Darstellung virtueller Objekte, mit realistischen Oberflächenstruktur, Materialeigenschaften, Methoden der Animation von virtuellen Objekten oder auch auf Methoden für realistische Lichtverhältnisse und Schattenwurf in virtuellen Umgebungen (wie sie von Encarnação et al. [ESK96, ESK97] beschrieben werden). Andererseits trifft man auch beim Kombinieren der Realitäten auf neue Problembereiche. Ronald Azuma [Azu97] stellt fest, dass diese hauptsächlich in den Bereichen der Registrierung liegen. Dabei geht es bei der Registrierung, um die genaue Ausrichtung von Objekten der realen und der virtuellen Welt, so dass die Illusion erschaffen wird, dass die Objekte in einer gemeinsamen Welt existieren. Bei dem Einsatz MR-gestützter Operationsmethoden (wie beim MEDAPRA Projekt [MED04]), ist eine exakte Registrierung nicht nur wünschenswert, sondern essentiell, wenn durch die virtuelle Darstellung die Lokalisierung eines Tumors ermöglicht werden soll (siehe [Abbildung 2.2\(b\)](#)). Eine exakte Ausrichtung der virtuellen und realen Objekte ist auch Voraussetzung für das Erzeugen von taktilen⁴ Sinneswahrnehmungen die von virtuellen Objekten ausgehen. Beispielsweise ist die exakte Position der Hand des Anwenders erforderlich, um feststellen zu können, ob seine Finger ein virtuelles Objekt berühren und wie die entstehenden Kräfte dabei aussehen.

Durch das Verfolgen und Bestimmen der Position und Orientierung von Objekten in der realen Umgebung, dem so genannten Tracking, wird die Registrierung in MR-Anwendungen ermöglicht. Zur vollständigen Bestimmung der Position eines Objektes im Raum sind dazu drei Angaben notwendig, wie beispielsweise die Angabe der x-, y- und z-Werte im dreidimensionalen Koordinatensystem. Ebenso sind für die vollständige Bestimmung der Orientierung eines Objektes drei Angaben notwendig, wie beispielsweise drei Rotationswinkel über die Koordinatenachsen (siehe [Abbildung 2.15](#)).

⁴zum Tastsinn gehörend

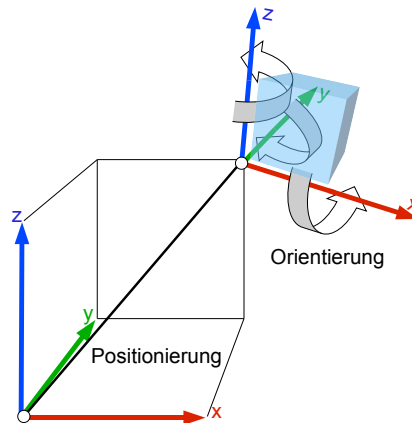


Abbildung 2.15: Orientierung und Positionierung

Die Anzahl der Freiheitsgrade ist genau die Anzahl der unabhängigen Werte, die zu bestimmen sind, um den Zustand eines Objektes vollständig zu beschreiben. Beim Tracking sind somit im Allgemeinen sechs Freiheitsgrade (drei der Position und drei der Orientierung) zu betrachten. Allerdings ist in besonderen Fällen die Bewegungsfreiheit der Objekte so eingeschränkt, dass die Anzahl der Freiheitsgrade reduziert ist. Beispielsweise reichen zur Orientierungsbestimmung einer schwenkbaren Kamera zwei Werte (der Schwenkwinkel in horizontaler Ebene und eventuell die horizontale Neigung).

Beim Bestimmen der Position und der Orientierung einzelner Objekte der realen Umgebung können verschiedenen Trackingtechnologien angewendet werden.

Elektromechanisches Tracking bei dem ein mechanischer Gelenkarm am bewegten Objekt befestigt wird, dessen Gelenkstellungen bestimmt werden.

Elektromagnetisches Feldmessung bei dem durch Messsensoren die Position in einem elektromagnetischen Feld bestimmt werden kann.

Tracking durch Lauflängenmessungen bei dem die Entfernung zu bekannten Raumpunkten gemessen wird, um daraus die Position zu bestimmen.

Tracking mit Trägheitssensoren die Änderungen in Orientierung oder Position durch träge Körper bestimmen.

Bildorientiertes Tracking das Bildinformationen auswerten, um daraus Orientierungs- und Positionierungsangaben zu extrahieren.

Im [Abschnitt 3.2](#) „Trackingtechnologien“ der Analyse werden die verschiedenen Trackingtechnologien genauer betrachtet, wobei auch auf deren Vor- und Nachteile eingegangen wird, nachdem bestimmte Kriterien für deren Untersuchung festgelegt worden sind.

2.2 Autorensysteme und Autorenwerkzeuge

Computergestützte Anwendungen kommen in unterschiedlichsten Gebieten zum Einsatz und bieten dabei eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten. Die Entwicklung von Computeranwendungen wird meist von Experten durchgeführt, die über spezielle Programmierkenntnisse verfügen.

Durch die flexiblen und kostengünstigen Systeme, werden Computertechnologien auch für den Heimanwender nutzbar, oder auch in anderen Fachgebieten einsetzbar, wie beispielsweise in der Medizin oder in der Automobilentwicklung. Die Entwicklung entsprechender Anwendungen wird dabei immer fachspezifischer und benötigt die Unterstützung des Personenkreises, aus dem Fachgebiet, indem die Applikation zur Anwendung kommen soll. Es kommen somit bei der Entwicklung von Applikationen verschiedene Autoren zum Einsatz, die zusammen genommen erst die Entwicklung ermöglichen.

Autorensysteme gehen auf diese verschiedenen Rollen ein und versuchen die Erstellung von Anwendungen durch vereinfachte Prozesse auch dem Personenkreis zu ermöglichen, der lediglich über geringe Kenntnisse in der Programmierung und Implementierung von Computeranwendungen verfügt.

Beispielsweise ermöglichen Autorensysteme die einfache Erstellung von Webinhalten, in dem sie dem Autor einer Webseite, Werkzeuge zur Verfügung stellen, die es ihm ermöglichen eine Seite zu entwerfen, ohne dabei den eigentlichen HTML-Code erstellen zu müssen. Das Autorensystem kann dabei die Manipulationsmöglichkeiten in Form einer gängigen Textverarbeitungsumgebung anbieten, so dass der Autor seine Kenntnisse zur Erstellung von Textdokumenten anwenden kann und dadurch in der Erstellung der Webseite nicht überfordert wird. Gleichzeitig sieht der Autor bei der Erstellung schon das Ergebnis mit Hilfe einer Vorschau und bekommt dann auch Werkzeuge vom Autorensystem zur Verfügung gestellt, die ihn bei der Veröffentlichung der erstellten Webseite über den Webhost unterstützen.

Bei der Erstellung von MR-Anwendungen treten die gleichen Probleme auf. Mit Hilfe von Autorensystemen, kann beispielsweise der Fachexperte sein Fachwissen zur direkten Erstellung von MR-Anwendungen nutzen, wobei ihm die Autorenwerkzeuge dabei helfen, die zu Grunde liegenden Methoden und Technologien zu beherrschen. Dabei müssen die Werkzeuge den Kenntnissen des Autors angepasst sein, um ihn zum einen nicht zu überfordern, aber zum anderen ihm auch die Möglichkeiten zur Hand geben, die Anwendung seinen Vorstellungen entsprechend anpassen zu können.

Gerade im MR-Bereich kommen spezielle Methoden und Technologien zum Einsatz, wie beispielsweise die Trackingtechnologien, deren Anwendung und Kontrolle den Großteil der Autoren überfordern. Ein Einsatz von angepassten Autorenwerkzeugen und kompletten Autorensystemen ist gerade in diesem Bereich notwendig.

Kapitel 3

Analyse und Vorüberlegung

In dem Kapitel der Analyse werden die Voraussetzungen für die Entwicklung der Konzepte geschaffen. Dazu wird zunächst die Vorgehensweise der Analyse genauer beschrieben. Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt dabei einerseits in der Beschreibung von verschiedenen Trackingtechnologien, und der Betrachtung von deren Vor- und Nachteilen. Andererseits wird die Voraussetzung für die Entwicklung von Autorenwerkzeugen betrachtet, auf Grund deren auch eine Wahl des MR-Systems durchgeführt wird, das in der späteren Implementierung zum Einsatz kommt.

3.1 Vorgehensweise der Analyse

Im ersten Teil der Analyse werden verschiedene Trackingtechnologien betrachtet, die anhand der zuvor festgelegten Kriterien bewertet werden. Diese Bewertung soll eine Wahl der Trackingtechnologie ermöglichen, die für die weitere Betrachtung entscheidend ist.

Anhand von verschiedenen MR-Anwendungsfällen wird die Einsatzmöglichkeit der gewählten Trackingtechnologie überprüft. Die dabei auftretenden Problembereiche der gewählten Technologie sollen dabei erkannt und auf eine generelle Lösbarkeit hin untersucht werden.

Diese generellen Ansätze stellen den Ausgangspunkt für die zu entwickelnden Konzepte dar. Wobei sich die Konzepte auf die Entwicklung von Autorenwerkzeugen konzentrieren, die dem Autor einer MR-Anwendung für die Problembereiche eine anwendbare Lösung anbieten.

Die Entwicklung von Autorenwerkzeugen verlangt dazu eine Betrachtung von bestehenden Autorensystemen, bei denen nach Ansätzen gesucht wird, die die Entwicklung von Autorenwerkzeugen zur Erstellung von MR-Anwendungen unterstützen. Dabei muss geklärt werden, wie der Autor die Werkzeuge zur Verfügung gestellt bekommt und wie die Werkzeuge den Autor im Produktionsprozess unterstützen.

Nach der Umsetzung dieser Ansätze wird eine Auswahl von MR-Systemen untersucht. Mit Hilfe dieser Betrachtung der MR-Systeme wird ein System ausgewählt, welches für die spätere Umsetzung der Konzepte herangezogen wird. Speziell das ausgewählte MR-System wird daraufhin untersucht, inwieweit die Problembereiche der gewählten Trackingtechnologie im System berücksichtigt werden.

3.2 Trackingtechnologien

Im Folgenden Abschnitt wird eine Betrachtung der verschiedenen Trackingtechnologien durchgeführt. Dabei werden die Vor- und Nachteile der einzelnen Technologien verdeutlicht.

Zur Beurteilung der einzelnen Trackingtechnologien werden dazu unterschiedliche Kriterien herangezogen. Es werden die Einsatzmöglichkeiten im Indoor- und Outdoor-Bereich und der entsprechende Installationsaufwand für den Einsatz betrachtet. Die einzelnen Trackingtechnologien werden dahingehend untersucht, wie die Genauigkeit der erzeugten Trackingangaben zu bewerten ist und welche Art der Angaben (Positions- und Orientierungsangaben) bestimmt werden können. Außerdem wird der Trackingbereich der Technologien betrachtet, wobei festgestellt wird welche einen eingeschränkten Anwendungsbereich besitzen und ob diese Bereiche eventuell erweiterbar sind.

Im Vordergrund der Beurteilung steht allerdings die einfache und kostengünstige Anwendbarkeit der Trackingtechnologien, was dem Ziel dieser Arbeit entspricht.

Alberto Menache [Men00] unterscheidet generell zwischen „outside-in“ Trackingsystemen, bei denen die Sensoren im Raum fest montiert sind und Referenzen am bewegten Objekt montiert werden (beispielsweise Infrarot LEDs, oder auch Infrarot Reflektoren auf einem Selektionswerkzeug beim bildorientierten Tracking), und „inside-out“ Trackingsysteme, bei denen die Sensoren am bewegten Objekt montiert sind, die dann die fest installierten Referenzen im realen Raum auswerten (beispielsweise elektromagnetische Sensoren, die Feldstärkeänderungen am bewegten Objekt messen). Diese Unterscheidung von Trackingtechnologien soll an dieser Stelle in den Hintergrund treten. Vielmehr soll die Funktionsweise der einzelnen Trackingtechnologien erläutert und nach den vorgestellten Kriterien untersucht werden.

3.2.1 Elektromechanisches Tracking

Beim elektromechanischen Tracking kommt ein System aus mechanischen Gelenken und Gelenkarmen zum Einsatz, dessen Gelenkstellungen elektronisch erfasst werden (siehe [Abbildung 3.1](#)). Ein Ende des Arms ist fest montiert, das andere Ende ist mit dem bewegten Objekt verbunden. Die Bestimmung der Position und Orientierung des bewegten Objektes wird dann durch Messen der Gelenkstellungen, mit Hilfe der Ausmaße der Gelenkarme und der Positionierung des statisch montierten Endes des Arms ermöglicht.

Die Vorteile dieser Trackingmethode liegen, laut John Vince [Vin98], in der hohen Genauigkeit, die bei der Positionsbestimmung im Bereich von 4mm und bei der Orientierungsbestimmung bei ca. $0,1^\circ$ liegt, und der geringern Verzögerung der Trackinginformation. Der eingeschränkte Trackingbereich, der durch den Wirkungsbereich der Gelenkarme festgelegt ist, verhindert den Einsatz dieser Trackingmethode in großflächigen Anwendungsgebieten und somit auch in Outdoor-Anwendungen, bei denen eine uneingeschränkte Bewegung vorausgesetzt wird.



Abbildung 3.1: Gelenkarmen für das elektromechanischen Tracking

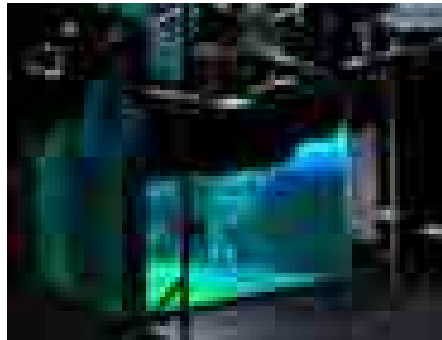
3.2.2 Tracking durch elektromagnetische Feldmessung

Elektromagnetisches Tracking verwendet Quellen zur Erzeugung eines elektromagnetischen Feldes und Sensoren, die in diesem Feld die Feldstärke an deren Positionen messen, wodurch Rückschlüsse über die Positionierung des Sensors relativ zur Quelle gezogen werden können. Durch Hindernisse aus Metall oder auch durch Stahlbeton wird allerdings die Verteilung des elektromagnetischen Feldes stark beeinflusst, wodurch auch die Sensorenmessungen und damit auch Positionsangaben beeinflusst werden. Um solche Störungen des elektromagnetischen Feldes zu vermeiden, wurde beispielsweise bei der Konstruktion der „Cave“ (ein begehbare Raum, der von mehreren Seiten eine Projektionsfläche bietet [CNSD93], siehe [Abbildung 3.2](#)) hauptsächlich auf Materialien wie Holz und Kunststoff zurückgegriffen, die dann das Tracking des Benutzers durch elektromagnetische Sensoren ermöglicht.

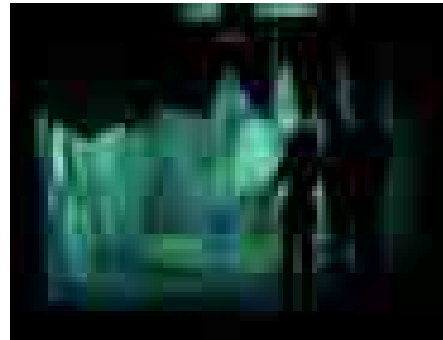
John Vince [[Vin98](#)] stellt einen maximalen Wirkungsbereich von elektromagnetischen Trackingsystemen von ca. 10 Metern fest, in dem dann eine hohe Messgenauigkeit in der Positionierung von ca. 3mm und in der Orientierung von ca. $0,1^\circ$ erreicht wird. Diese Beschränkung des Wirkungsbereiches und die Probleme, die durch Materialien entstehen, die im Einsatzgebiet das elektromagnetische Feld beeinflussen, schränken die möglichen Einsatzgebiete auf speziell konstruierte Räume oder Umgebungen ein.

3.2.3 Magnetkompass

Mit Hilfe eines Kompasses kann die Ausrichtung eines Objektes innerhalb eines Magnetfeldes (meistens das Erdmagnetfeld) bestimmt werden. Dabei richtet sich die Kompassnadel in Richtung der Magnetfeldlinien aus, wodurch allerdings nur einer der drei Freiheitsgrade bestimmt werden kann, die für die Orientierung eines Objektes relevant



(a) Eine Darstellung der „Cave“



(b) Eine kleine Gruppe während der Anwendung in der „Cave“

Abbildung 3.2: Die Cave der Mississippi State University, Engineering Research Center for Computational Field Simulation

sind. Die Bestimmung der Ausrichtung kann allerdings in einer hohen Rate von 300Hz¹ erfolgen, wobei auch eine hohe Genauigkeit von 1° erreicht wird [RDB01]. Die träge Ausrichtung der Kompassnadel verursacht allerdings Probleme bei abrupten Richtungsänderungen.

3.2.4 Inklinationskompass

Der Inklinationskompass (Inclinometer) nutzt die Gravitation aus, um die Neigung eines Objektes zu messen. Dazu wird die horizontale Ausrichtung der Oberfläche einer viskosen Flüssigkeit bestimmt, was mit Hilfe von Leuchtdioden und Photozellen² geschehen kann. Die Neigung der Flüssigkeitsoberfläche hat eine unterschiedliche Beleuchtung der Photozellen zufolge (siehe [Abbildung 3.3](#)), wodurch mit der Messung des elektrischen Widerstandes Rückschlüsse auf die Neigung gezogen werden können.

Genau wie der Magnetkompass ermöglicht der Inklinationskompass nur die Bestimmung eines der drei Freiheitsgrade, die für die Orientierung eines Objektes erforderlich sind. Laut Rolland et al. [RDB01] besitzt die Neigungsmessung eine hohe Genauigkeit von bis zu 0,1° und kann mit einer hohen Updaterate von 40Hz abgefragt werden. Abrupte Bewegungen können allerdings nur verzögert erkannt werden, was an der hohen Viskosität der verwendeten Flüssigkeiten liegt. Außerdem verfälschen starke Beschleunigungen die gemessene Neigung.

3.2.5 Tracking durch Lauflängenmessungen

Trackingtechnologien die auf Lauflängenmessungen beruhen können mit akustischen Ultraschallsignalen, oder elektromagnetischen Wellensignalen arbeiten [RDB01]. Dabei

¹1 Hz (Herz) entspricht einem Messwert pro Sekunde

²Eine Photozelle ändert ihren elektrischen Widerstand in Abhängigkeit vom einfallenden Licht

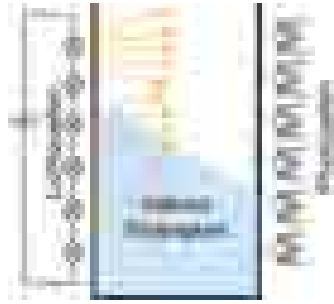


Abbildung 3.3: Inklinationskompass

kommt ein Netzwerk von Signalquellen zum Einsatz, deren Positionierungen wohl definiert sind. Ein Sensor misst die Lauflänge des Signals zwischen Quelle und Sensor, wodurch mit Hilfe der festen Übertragungsgeschwindigkeit des Signals die Entfernung zwischen Quelle und Sensor bestimmt werden kann.

Bei der Messung mit einer Quelle kann nur festgestellt werden, dass sich der Sensor in einem bestimmten Abstand zur Quelle befindet, wodurch der Aufenthaltsort des Sensors auf die Hülle einer der Quelle umgebenden Kugel eingeschränkt ist. Bei mehreren Signalquellen muss die Schnittmenge dieser Kugeloberflächen bestimmt werden, wobei in [Abbildung 3.4\(a\)](#) dargestellt ist, dass bei einer Kombination von zwei Signalquellen, die Position auch nicht eindeutig bestimmt ist, allerdings auf einem Kreis zwischen den Quellen liegen muss. In [Abbildung 3.4\(b\)](#) wird gezeigt, dass auch bei drei Signalquellen die Position an zwei verschiedenen Orten liegen kann. Erst durch die Kombination von mindestens vier solcher Lauflängeninformationen kann dann die Position des Sensors eindeutig bestimmt werden.

Beim Global Positioning System (GPS) kommt diese Technik im großen Maßstab zum Einsatz, wobei die Signalquellen Satelliten auf festgelegten Umlaufbahnen sind. Es ermöglicht eine Positionsangabe im freien Gelände, auch ohne aufwendige Vorinstallation, wie sie beispielsweise in Navigationshilfen in Automobilen zum Einsatz kommt.

Durch die Abschirmung der GPS Signale innerhalb von Gebäuden wird dort der Einsatz allerdings verhindert. GPS Tracking gibt auch keine Informationen über die Orientierung, weswegen eine zusätzliche Trackingtechnologie eingesetzt werden muss, die diese zusätzliche Information bietet. Rolland et al. [[RDB01](#)] stellen bei dem Outdoor-Einsatz des GPS eine geringe Messgenauigkeit von ca. 10m fest, die dann auch noch mit der Anzahl der empfangenen Satellitensignale abnimmt, wobei eine Updaterate der Messung von mehreren 100Hz möglich ist.

Bei der akustischen Lauflängenmessung hängt die Übertragungsgeschwindigkeit des Signals von den Eigenschaften des Übertragungsmediums ab [[Vin98](#)], wie beispielsweise Lufttemperatur und -dichte, die dann zu Ungenauigkeiten in der Lauflängenbestimmung führt. Foxlin et al. [[FHP98](#)] präsentieren ein Trackingsystem, das auf der Lauflängenmessung von Ultraschallwellen beruht und ein installiertes Netzwerk von Signalquellen voraussetzt (siehe [Abbildung 3.5](#)).

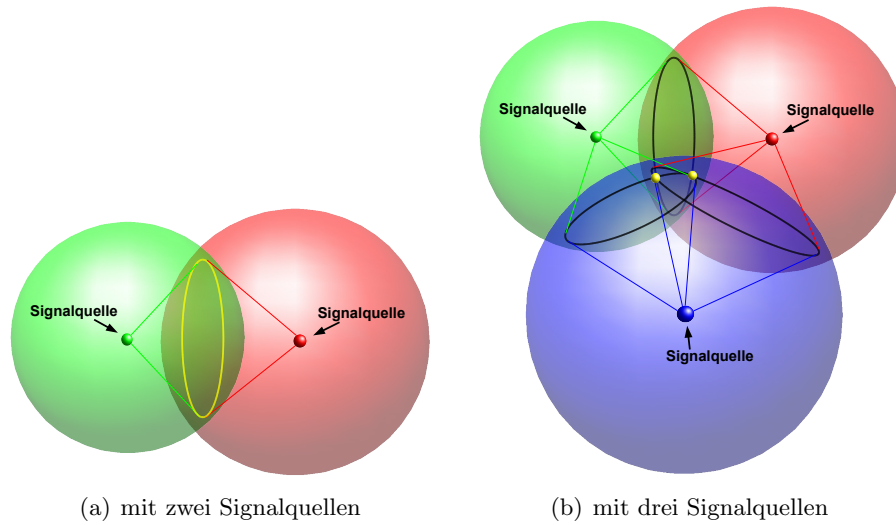


Abbildung 3.4: Positionsbestimmung durch Laufzeitenmessung

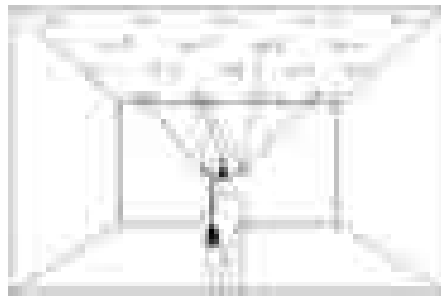


Abbildung 3.5: Prinzip der Ultraschall Laufzeitenmessung [FHP98]

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung hängt dabei von der Geometrie des vorinstallierten Signalquellennetzes und des Abstandes des Objektes zum Netzwerk ab. Es ist allerdings eine hohe Genauigkeit von unter 2mm erreichbar. Durch den Einsatz von mehreren Sensoren (Foxlin et al. [FHP98] verwenden drei Sensoren, die die Orientierungsbestimmung des Kopfes ermöglichen, siehe [Abbildung 3.5](#)) wird auch eine Orientierungsbestimmung ermöglicht, die dann eine hohe Genauigkeit von $0,25^\circ$ bietet, welche dann wiederum abhängig von der Verteilung der Signalquellen ist. Die Updaterate dieses Trackingsystems ist mit ca. 500Hz hoch, allerdings sind die Kosten des Systems auch hoch, da eine Vielzahl von Signalquellen über den gesamten Anwendungsbereich zum Einsatz kommen muss.

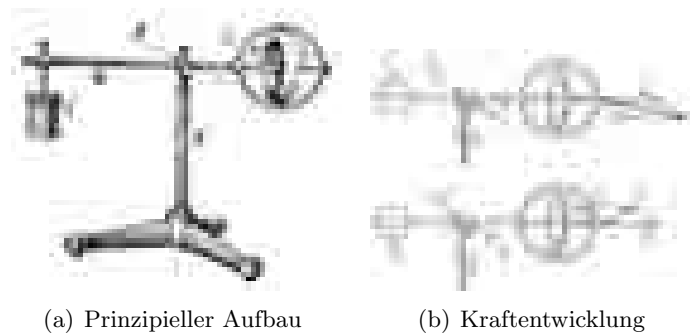


Abbildung 3.6: Das Prinzip des Gyroskops [GGG90]

3.2.6 Tracking durch Trägheitssensoren

Weitere Trackingtechnologien nutzen die Trägheit der Masse aus, die zur Folge hat, dass eine bewegter Körper seinen Bewegungszustand beibehalten will [Tip98]. Das mechanische Gyroskop nutzt die Massenträgheit in Rotationsbewegungen (das Trägheitsmoment) eines Kreisels aus. Zugrunde liegt dabei die Drehimpulserhaltung, die dafür sorgt, dass von außen einwirkende Kräfte auf einen rotierenden Kreisel bestimmte Ausgleichsbewegungen des Kreisels erzwingen. Im Gyroskop wird dieses Verhalten genutzt, um die von außen bewirkte Orientierungsänderung, durch Messung der Stärke und Richtung der Ausgleichskraft zu bestimmen (siehe [Abbildung 3.6](#)).

Laut Rolland et al. [RDB01] können die Orientierungsangaben mit einer hohen Rate von 50Hz abgefragt werden. Die Genauigkeit der Orientierungsbestimmung liegt bei $0,2^\circ$, allerdings besitzt diese Orientierungsbestimmung einen statischen Drift, der durch Reibungsverluste zustande kommt und zu einem kontinuierlich wachsenden Fehler in der Messung führt.

Beim Beschleunigungszähler „Accelerometer“ [RDB01] wird ebenfalls eine Kraft gemessen, deren Größe sich proportional zur Beschleunigung einer bestimmten trägen Masse verhält. Es wird also das Trägheitsprinzip für Translationsbewegungen ausgenutzt [Tip98]. Dadurch lassen sich Rückschlüsse auf die Geschwindigkeit und somit auch auf Position des Objektes ziehen, sofern die Startposition und -geschwindigkeit definiert sind.

Auch bei diesem Trägheitssensor stellen Rolland et al. [RDB01] eine hohe Updaterate fest, allerdings auch einen statischen Drift (wie beim Gyroskop), der zu einer kontinuierlich wachsenden Abweichung vom realen Wert führt, wobei sich schon geringe Messfehler über die Laufzeit aufaddieren. Die Sensoren können in leichter Bauart hergestellt werden und sind genau wie das Gyroskop unabhängig vom Anwendungsgebiet einsetzbar.

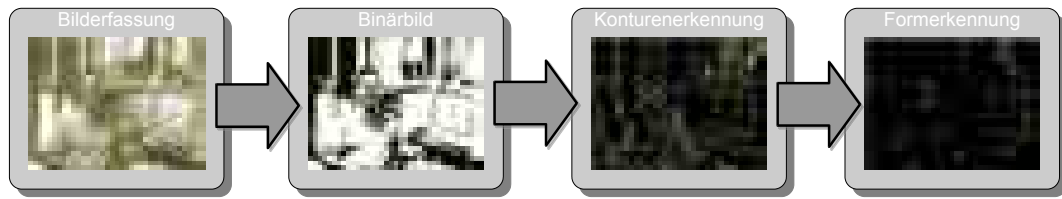


Abbildung 3.7: Bildanalyse des bildorientierten Tracking (nach [AMI04a])

3.2.7 Bildorientiertes Tracking

Beim bildorientierten Tracking werden Bilderfassungstechnologien (beispielsweise Infrarot-Kameras, oder Webcams) benutzt, um aus den erfassten Digitalbildern mit Hilfe von Bildanalyseverfahren, Merkmale der aufgenommen Umgebung zu extrahieren, die dann Informationen über die Positionierung von Objekten im realen Raum geben.

Die Analyse der Bildsequenzen folgt dabei meist der Verarbeitungskette, wie sie in [Abbildung 3.7](#) dargestellt ist. Ein Bild der Videoaufnahme wird dazu zunächst erfasst, um es anschließend durch die Erzeugung von binären Bildinformationen zu vereinfachen, damit die darauf folgenden Analyseschritte nicht an Performance verlieren. Die binäre Bildinformation wird dann auf Kanten und Konturen hin untersucht, um daraufhin Gestalt und Form einzelner Objekte erkennen zu können.

Wird aufgrund der Form ein Objekt im Bild erkannt, kann anhand der Position und Ausrichtung im Videobild, die Positionierung und Orientierung im Raum berechnet werden. Dazu müssen anhand der Bildkoordinaten und der perspektivischen Transformation, die durch die Kameraprojektion entsteht, Entfernung und Orientierung berechnet werden. Zu dieser Berechnung müssen die Eigenschaften der verwendeten Kamera berücksichtigt werden, die zu einer Verzerrung des Bildes führen können, wenn beispielsweise bestimmte Objektive verwendet werden. Zur Bestimmung solcher Eigenschaften der Kamera muss zuvor eine Kalibrierung durchgeführt werden, die diese Verzerrungen bestimmt, die dann in der Bildanalyse berücksichtigt werden kann [FSP99, LZ02].

Unter den bildorientierten Trackingtechnologien gibt es Verfahren, die mit speziellen, zusätzlich in der realen Umgebung montierten, Markern arbeiten. Diese Marker (beispielsweise Infrarot LEDs, Kreismuster [Abbildung 3.8](#) oder quadratische Bildmuster) sind so konzipiert, dass sie durch Bildanalysemethoden (z.B. Filterung zur Linien- und Kantendetektion) gut extrahiert werden können und deren Anordnung oder Geometrie Informationen über deren Lage im realen Raum bieten (siehe [Abbildung 3.9](#)).

Neumann et al. [NYC⁺99] betrachten markerbasiertes Tracking in der speziellen Form von Kreismarkern und stellen dabei zunächst fest, dass die Erkennung der Marker von deren Größe und dem Abstand zur Kamera abhängen. Ist der Marker zu klein für den gewählten Abstand, unterschreitet die Darstellung des Markers die Größe von wenigen Pixeln im Kamerabild, und kann somit nicht mehr extrahiert werden. Der Trackingbereich von einer Kombination aus Kreismarkern mit Durchmesser von 2cm, 4cm und 8cm,

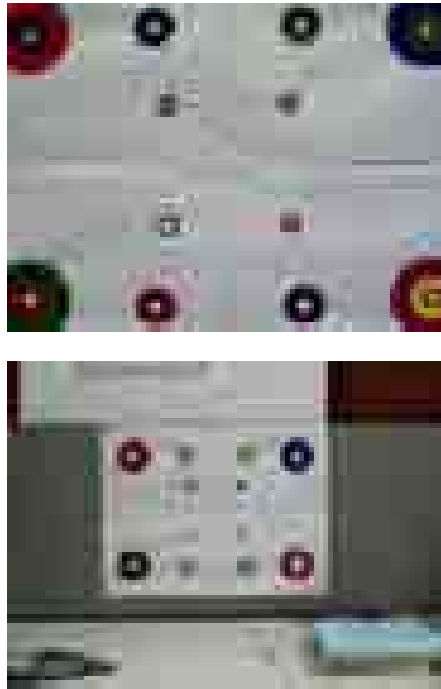


Abbildung 3.8: Marker in Form von konzentrischen Kreismustern [NYC⁺99]



Abbildung 3.9: Markerbasiertes Tracking mit quadratischen Bildmustern [KBP⁺00b]

geht bei einer Standard-Kameraauflösung von 640x480 Pixel bis zu 4,5m [NYC⁺99], wobei eine Updaterate von mindestens 6Hz erreicht wird.

Malbezin et al. [MPT02] betrachten das Tracking von quadratischen Bildmustern, wie sie in der ARToolKit Trackingsoftware [KBP00a] verwendet werden, und stellen dabei Ungenauigkeiten fest, die vom Abstand des Markers zur Kamera und von der Orientierung des Markers zur Kamera abhängig sind. Die Messungen ergaben bei einem 20cm x 20cm großen Marker einen Messfehler in der Positionsangabe im Bereich 6% bis 18% des Abstandes von Kamera zum Marker.

Markerbasierte Trackingsysteme, die mit Bildmustern arbeiten, besitzen laut Rekimoto und Ayatsuka [RA00] den wesentlichen Vorteil geringste Kosten zu verursachen, da die Marker per Drucker erstellt werden können und der Einsatz von gängigen Digitalkameras oder Webcams ausreicht. Die Marker können einfach montiert werden und sind auch einfach zu entfernen.

Andere bildorientierte Trackingverfahren verzichten auf den Einsatz von Markern in der realen Umgebung. Chia et al. [CCP02] beschreiben ein markerloses Kamera-tracking, das mit Referenzbildern arbeitet, bei denen die Kameraausrichtungen bekannt sind (siehe [Abbildung 3.10](#)). Dazu werden natürliche Kennzeichnungen (Natural Features) in den Bildern anstelle der Markierungen betrachtet. Im Kamerabild müssen dann diese Kennzeichnungen wiedergefunden werden, um deren Positionsänderung, und damit auch die Kamerabewegung, feststellen zu können. Genau diese Zuordnung von Kennzeichnungen werden von Chia et al. [CCP02] als problematisch befunden, da sich die natürlichen Kennzeichnungen im Bild auch mit der Kamerabewegung ändern. Die Trackingumgebung muss statisch sein und genügend natürliche Markierungen, in Form von Ecken und Kanten besitzen [CCP02]. Die Bedingung der statischen Umgebung verhindert meist den Einsatz dieses Trackingverfahrens im Outdoor-Bereich, da natürliche Umgebungen meist belebt sind (beispielsweise durch den Wind in den Bäumen oder Personen in der Stadt).

Stricker [Str01] beschreibt ein markerloses Trackingverfahren, das auch mit Referenzbildern arbeitet und im ARCHEOGUIDE Projekt [ARC04] entwickelt wurde. Dabei werden 2D-Transformation auf dem aktuellen Bild (z.B. die aktuelle Kamerasicht) angewandt, um eine möglichst deckungsgleiche Überlagerung zwischen dem aktuellen und einem Referenzbild zu finden dessen Kameraorientierung bekannt ist. Welches Referenzbild dazu verwendet wird, ist mit Hilfe einer Korrelationsfunktion zu bestimmen (siehe [Abbildung 3.11](#)), die ein Maß dafür sein soll, wie ähnlich sich die Bilder sind. Mit Hilfe der 2D-Transformation und der Kameraorientierung des Referenzbildes, wird dann die aktuelle Kameraorientierung berechnet. Dieses Trackingverfahren funktioniert allerdings nur zur Orientierungsbestimmung an einer festgelegten Kameraposition, mit statischer Umgebung, was den Einsatzbereich des Verfahrens stark einschränkt.

Neumann et al. [NYC⁺99] stellen einen Ansatz vor, der auch ohne Referenzbilder auskommt. Dabei werden auch „Natural Features“ des Bildes extrahiert und in einer Sequenz von Bildern kombiniert, so dass aus der Bewegung der Feature Punkten die

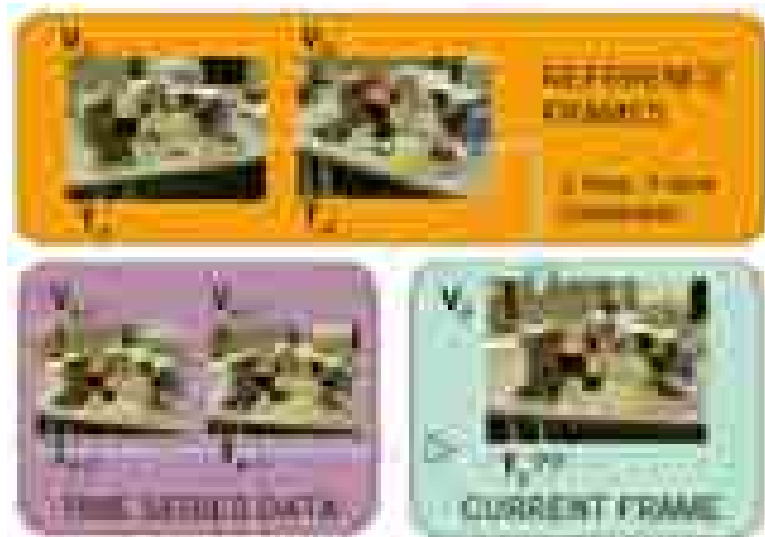


Abbildung 3.10: Markerloses Tracking mit Hilfe von Referenzbildern [CCP02]

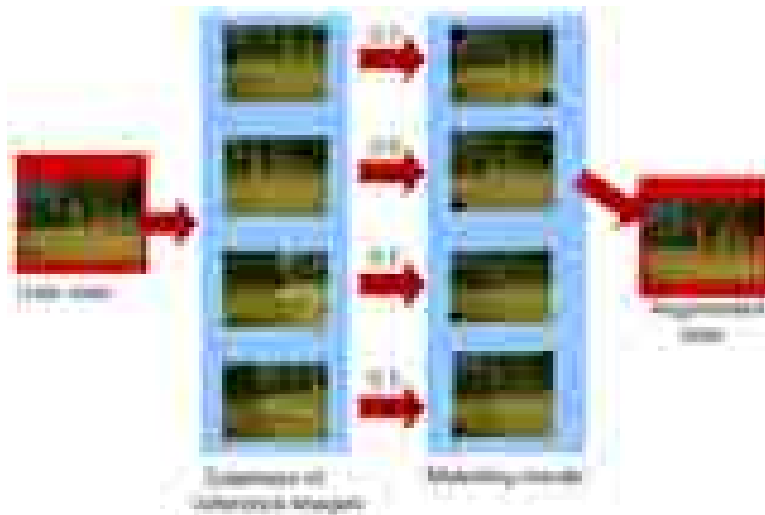


Abbildung 3.11: Tracking mit Hilfe von Referenzbildern und Korrelationsfunktion [Str01]

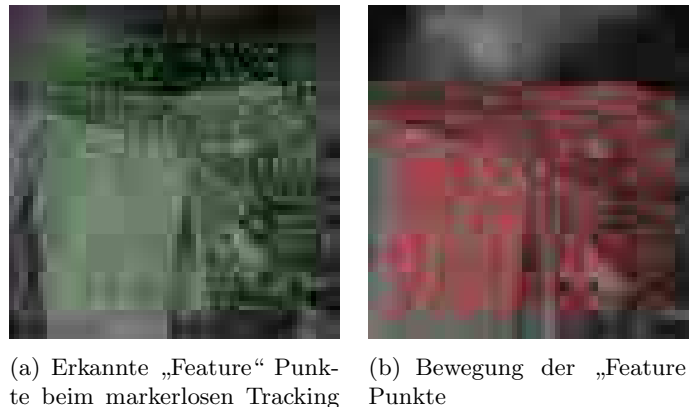


Abbildung 3.12: Markerloses Tracking ohne Referenzbilder [NYC⁺99]

Kamerabewegung berechnet werden kann (siehe [Abbildung 3.12](#)). Allerdings ist diese Technik eher experimentell und kann deshalb als vollständiges Trackingsystem nicht fungieren.

3.2.8 Hybride Trackingsysteme

Bei hybriden Trackingsystemen werden die Trackinginformationen aus verschiedenen Trackingtechnologien kombiniert, wodurch die Nachteile der einzelnen Trackingtechnologien (wie beispielsweise die Trackingprobleme des bildorientierten Trackings, die durch Verdeckung entstehen, oder die unzureichenden Informationen über die Orientierung beim Verwenden eines Kompasses) aufgehoben und dadurch das Tracking verbessert werden soll [NYC⁺99].

Azuma et al. [AHNS99] kombinieren die Trackinginformationen des Gyroskops und Kompasses und erhalten dadurch eine Orientierungsbestimmung, die einerseits die Probleme des statischen Drift beim Gyroskop und das Problem der abrupten Richtungsänderungen beim Kompass beheben.

Reitmayr und Schmalstieg [RS03] kombinieren das GPS Tracking mit dem markerbasierten Tracking, wobei GPS zur Bestimmung der globalen Position bei einer Navigationshilfe verwendet wird (in welchem der unterteilten Bereiche befindet man sich) und die markerbasierten Trackinginformationen zur Darstellung der virtuellen Navigationsanweisungen verwendet werden.

Außerdem beschreiben Reitmayr und Schmalstieg [RS01b, RS01a] einen generellen Ansatz zur Kombination von Trackingquellen. In der Softwarearchitektur „OpenTracker“, die die Kombination verschiedenster Trackingquellen ermöglicht (darunter fallen auch Quellen mit unterschiedlicher Trackingtechnologie), kann mit Hilfe von XML-basierten Beschreibungen die Konfiguration der Kombination vorgenommen werden. Diese Konfiguration legt die Filterung und die Art der Vereinigung der Trackinginfor-

mationen fest, genauso wie den Zugriff auf die Trackingquellen, die sich auch innerhalb eines verteilten Netzwerkes befinden können.

3.2.9 Bewertung der Trackingtechnologien

Zunächst ist festzustellen, dass es die optimale Trackingtechnologie nicht gibt, da jede der vorgestellten Technologien neben ihren Vorteilen auch Nachteile besitzt (siehe [Tabelle 3.1](#)). Das Gyroskop, der Magnetkompass und der Inklinationskompass bieten keine Informationen über die Positionierung. GPS und Accelerometer geben keine Auskunft über die Orientierung. Markerloses Tracking mit Referenzbildern, elektromechanisches Tracking und elektromagnetisches Tracking sind nur bedingt im Outdoorbereich einsetzbar. Der Einsatz von Ultraschallsensoren birgt einen hohen Installationsaufwand. Markerloses Tracking ohne Referenzbilder unterliegt hohen Messfehlern und der Einsatz von markerbasierten Tracking beschränkt den Trackingbereich auf die vorpräparierten Umgebungen.

Betrachtet man die Trackingtechnologien allerdings unter dem Gesichtspunkt der einfachen, flexiblen und günstigen Verwendung, die sich auch nicht auf den Indoor- oder Outdoorbereich beschränken, heben sich die markerbasierten Trackingtechnologien hervor. Sie können mit einfachsten Mitteln, beispielsweise mit handelsüblichen Digitalkameras oder Webcams, zum Einsatz kommen und bieten genaue und vollständige Trackingangaben.

Dies begründet auch die Wahl der markerbasierten Trackingtechnologie, die im Mittelpunkt dieser Arbeit steht. Allerdings ist auch auf Probleme beim markerbasierten Tracking hingewiesen worden, was im Folgenden zu einer genaueren Betrachtung der Trackingtechnologie in verschiedenen Anwendungsfällen führt.

3.3 Anwendungsfälle und deren Auswirkungen auf das Tracking

Unterschiedliche Anwendungsszenarien stellen auch unterschiedliche Anforderungen an das Trackingsystem, dabei können Probleme durch die Wahl einer speziellen Trackingtechnologie auftreten, die durch deren Eigenschaften entstehen, wie sie in dem vorigen Abschnitt dargestellt wurden.

An dieser Stelle werden verschiedene Szenarien für MR-Anwendungen betrachtet, um einerseits die Einsatzfähigkeit von markerbasierten Trackingsystemen zu belegen. Andererseits werden dazu die speziellen Voraussetzungen an das Trackingsystem und die daraus entstehenden Probleme, die durch den Einsatz von markerbasierten Trackingtechnologien auftreten, betrachtet, und auf grundsätzliche Lösungsansätze dieser Probleme hingewiesen.

Trackingtechnologie	Kriterien		Outdoor-Einsatz	Größe des Trackingbereichs	Erweiterung des Trackingbereichs	Orientierungsbestimmung	Positionsbestimmung	Installationsaufwand	Messgenauigkeit	Kosten
	Indoor-Einsatz									
Elektromechanisch	Ja	Bedingt	Beschränkt	Nicht möglich	Ja	Ja	Ja	Gering	Hoch	Hoch
Elektromagnetische Feldmessung	Bedingt	Bedingt	Beschränkt	Nicht möglich	Ja	Ja	Ja	Mittel	Hoch	Mittel
Laufängenmessung GPS	Nein	Ja	Unbeschränkt	Beliebig	Nein	Ja	Ja	Gering	Gering	Gering
Laufängenmessung Ultraschall	Ja	Ja	Beschränkt	Beliebig	Ja	Ja	Ja	Hoch	Hoch	Hoch
Magnetkompass	Ja	Ja	Unbeschränkt	Beliebig	Bedingt	Nein	Nein	Gering	Hoch	Gering
Inklinationskompass	Ja	Ja	Unbeschränkt	Beliebig	Bedingt	Nein	Nein	Gering	Hoch	Gering
Gyroskop	Ja	Ja	Unbeschränkt	Beliebig	Ja	Nein	Nein	Gering	Mittel	Gering
Accellerometer	Ja	Ja	Unbeschränkt	Beliebig	Nein	Ja	Ja	Gering	Mittel	Gering
Markerbasiert	Ja	Ja	Beschränkt	Beliebig	Ja	Ja	Ja	Mittel	Mittel	Gering
Markerlos mit Referenzbildern	Ja	Bedingt	Beschränkt	Beliebig	Ja	Bedingt	Bedingt	Mittel	Hoch	Gering
Markerlos ohne Referenzbilder	Ja	Ja	Beschränkt	Beliebig	Ja	Ja	Ja	Gering	Gering	Gering

Tabelle 3.1: Vergleich der Trackingtechnologien

3.3.1 Tracking in unpräparierten Umgebungen

Das größte und unlösbare Problem stellt für das markerbasierte Tracking eine reale Umgebung dar, in der keine zusätzlichen Markierungen angebracht werden können. Wenn das Trackingsystem, wie beim markerbasierten Tracking, auf solche zusätzlichen Markierungen in der realen Umgebung angewiesen ist, kann diese Trackingtechnologie in unpräparierten Umgebungen nicht eingesetzt werden.

3.3.2 Tracking über kleine Distanzen

Bei kleinen Abständen zwischen Kamera und betrachteten Objekt ist durch das eingeschränkte Sichtfeld der Kamera nur ein Bruchteil des realen Objektes sichtbar. In diesem Bereich kann nur eine geringe Anzahl von Markierungen verwendet werden.

Beispielsweise können bei naher Betrachtung eines realen Objektes, die Marker aus dem Sichtfeld fallen, obwohl die damit angezeigte virtuelle Geometrie noch teilweise im Sichtfeld dargestellt werden müsste.

Die Marker im sichtbaren Bereich der Kamera müssen dann die Trackinginformationen der nicht sichtbaren Marker rekonstruieren. Die verwendeten Marker müssten so kombiniert werden, dass diese Rekonstruktion möglich wird.

3.3.3 Tracking über große Distanzen

Bei größeren Abständen zwischen Kamera und Marker kann es dazu kommen, dass keine Trackinginformationen mit Hilfe des weit entfernten Markers bestimmt werden kann. Ist der Marker zu klein für den gewählten Abstand, unterschreitet die Darstellung des Markers die Größe von wenigen Pixeln im Kamerabild, und kann somit nicht mehr extrahiert werden. Die Bestimmung von Position und Orientierung des Markers wird dadurch unmöglich.

Beispielsweise kann ein Marker neben einen Notausgang verwendet werden, um den Notausgang mit einer virtuellen Markierung leichter erkennbar zu machen. Befindet sich dieser Notausgang am Ende eines langen Ganges, wird die virtuelle Markierung des Ausganges nicht angezeigt, da der Marker neben dem Ausgang zu weit entfernt ist.

Die Größe des Markers kann in diesem Fall angepasst werden, so dass aufgrund der größeren Darstellung die Orientierung und Positionierung wieder extrahiert werden kann. Allerdings gibt es auch dafür eine Grenze des Machbaren, da bei Entfernungen im Kilometerbereich Markergrößen erforderlich sind, die nicht mehr realisierbar sind. In diesem Fall können allerdings mehrere Marker in unterschiedlichen Abständen zur Kamera eingesetzt werden, so dass zu den verschiedenen Abständen immer mindestens ein Marker im Kamerabild erkannt werden kann.

3.3.4 Anwendungen mit großem Trackingbereich

Bei großen Trackingbereichen kann eine Vielzahl von Markern zum Einsatz kommen, um den kompletten Bereich abdecken zu können. Dabei steigt die Anzahl der verwen-

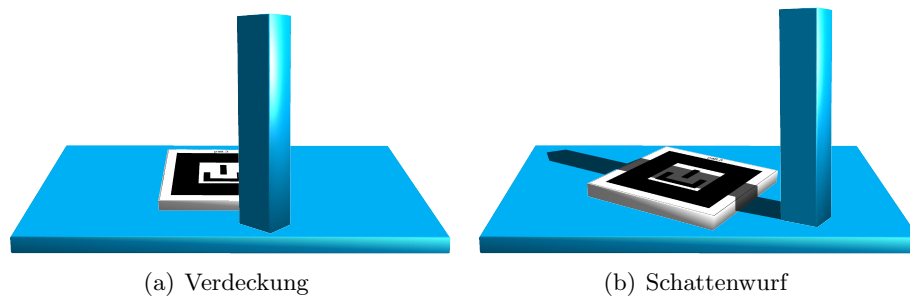


Abbildung 3.13: Trackingprobleme

deten Marker mit der Größe des Trackingbereiches. Die einzelnen Marker müssen dabei vom System eindeutig identifiziert werden können, um deren Trackinginformation richtig zuordnen zu können. Mit zunehmender Anzahl von Markern wird es schwieriger eindeutig unterscheidbare Marker zu erstellen, die dann auch unter widrigen Umständen von System noch richtig zugeordnet werden können. Die Performance des Systems erzwingt eine Beschränkung der Anzahl von Markern [OXM02], gerade bei großen Anwendungen, da der Aufwand der Überprüfung auch mit der Anzahl der Marker wächst.

Bei einer Navigationshilfe in einem großen mehrstöckigen Gebäude, dessen Stockwerke aus mehreren Räumen besteht, muss eine Vielzahl von Markern eingesetzt werden, damit zu jedem Zeitpunkt der Anwender Orientierungshilfen in Form von virtuellen Wegweisern, angeboten bekommt.

Eine Wiederverwendung von Markern würde die Probleme des Designs von gut unterscheidbaren Markern und dem Performanceproblem des Systems umgehen.

3.3.5 Tracking in dynamischen Umgebungen

Befinden sich in der realen Umgebung auch bewegte Objekte, können diese zu einer Verdeckung von Marker führen, wodurch das Tracking mit Hilfe dieser verdeckten Marker verhindert wird. Ebenfalls kann der Schattenwurf von realen Objekten das Tracking von Markern verhindern, da durch den Schatten, wie in [Abbildung 3.13\(b\)](#) dargestellt, die ausgezeichnete Form des Markers verloren geht.

Bei einer Anwendung die eine MR-Montageanleitung realisiert, können die einzelnen Bauelemente mit Hilfe von darauf befestigten Markierungen erkannt werden, und mit Hilfe von virtuellen Kombinationsanweisungen der Bauelemente, der Zusammenbau unterstützt werden. Während der Montage wird mit diesen Bauelementen gearbeitet, so dass die einzelnen Marker der Elemente verdeckt werden können (siehe [Abbildung 3.13\(a\)](#)), wodurch keine virtuelle Hilfestellungen zu den verdeckten Bauelementen angezeigt werden kann.

Werden mehrere Marker auf den Objekten verwendet, können die Trackinginformationen der verdeckten, oder überschatteten Marker mit Hilfe der anderen reproduziert werden.

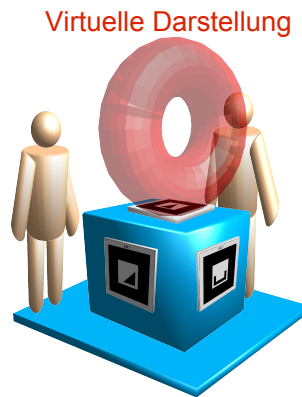


Abbildung 3.14: Orbitinganwendung des Tracking

3.3.6 Tracking mit bewegter Kamera

Durch Bewegung der Kamera können Marker aus deren Sichtfeld verschwinden, wodurch mit Hilfe dieser Marker keine Trackinginformation erlangt werden kann. Es können Verdeckungen der Marker durch statische Objekte der Umgebung bei ungünstigen Kamerapositionen stattfinden. Genauso kann ein Marker zwar im Sichtfeld der Kamera liegen, aber durch die Orientierung des Marker kann nur dessen Rückseite erkannt werden.

Beispielsweise kann eine virtuelle Museumsbegleitung einem Besucher Zusatzinformationen zu Kunstwerken anbieten, die mit Hilfe von Markierungen neben den Ausstellungsstücken angezeigt werden können. Manche Ausstellungsstücke, wie Statuen, stehen in der Mitte des Raumes und können von beliebigen Blickwinkeln betrachtet werden, zu denen dann auch die virtuelle Information dargestellt werden muss.

Werden mehrere Marker verwendet, können die Trackinginformationen der verdeckten Marker, der Marker die außerhalb des Sichtfeldes der Kamera liegen oder der Marker die ungünstig zur Kamera orientiert sind, mit Hilfe der anderen reproduziert werden. Dadurch wird auch eine Betrachtung aus beliebiger Blickrichtung (wie beispielsweise beim „Orbiting“, dem dynamischen Betrachten von allen Seiten siehe [Abbildung 3.14](#)) ermöglicht.

3.3.7 Hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Trackinginformation

Die Genauigkeit der Orientierungs- und Positionierungsbestimmung ist beim markerbasierten Tracking abhängig von der Distanz zwischen Marker und Kamera und der Kameraauflösung [NYC⁺99]. Die Genauigkeit ist dabei allerdings beschränkt, wie es schon bei der Betrachtung in [Unterabschnitt 3.2.7](#) festgestellt wurde. Allerdings gibt es Anwendungen, bei denen eine genauere Angabe zur Orientierung und Positionierung verlangt wird, als es das Tracking von Markern ermöglicht.

Im medizinischen Umfeld kommen MR-Systemen zum Einsatz, die zur Unterstützung von Ärzten bei operativen Eingriffen verwendet werden, wobei dem Arzt beim Eingriff beispielsweise Zusatzinformationen aus den Ergebnissen der Computertomographie zur Verfügung gestellt werden können, um eine Unterscheidung von erkranktem und gesundem Gewebe zu erleichtern. Dabei ist ein exaktes Tracking erforderlich, damit der Arzt, auf Grund einer eventuell falsch positionierten Visualisierung, kein gesundes Gewebe verletzt.

Ist eine höhere Genauigkeit erforderlich können die Trackinginformationen von mehreren Markern kombiniert werden, um Schwankungen in der Orientierungs- und Positionsbestimmung der einzelnen Trackinginformationen auszugleichen.

Andere Ansätze liegen in der Filterung von Trackinginformationen, bei denen Schwankungen in den Orientierungs- und Positionierungsangaben berücksichtigt werden und Fehlmessungen oder fehlerhafte Angaben ausgefiltert werden.

3.3.8 Zusammenfassung

In den vorgestellten Anwendungsfällen, bei dem das Tracking in realen Umgebungen stattfindet, in Umgebungen die sich dynamisch ändern, oder bei denen sich die Kamera bewegt, wurde festgestellt, dass die dabei entstehenden Probleme des markerbasierten Tracking hauptsächlich in der Verdeckung von Markern liegen. Genau wie beim Tracking über große und kleine Distanzen, können die auftretenden Probleme durch das Kombinieren von Markern behoben werden, wobei mit Hilfe der sichtbaren Marker die Trackinginformationen von verdeckten oder nicht erkennbaren Markern rekonstruiert werden können. Bei Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Genauigkeit der Trackinginformation können ebenfalls Markerkombinationen zum Einsatz kommen, bei denen, durch redundante Trackinginformationen, Schwankungen in der Positions- und Orientierungsbestimmung der einzelnen Marker verringert werden können.

Bei Anwendungen mit großem Trackingbereich kann die Anzahl der Marker so stark anwachsen, dass eine Wiederverwendung von Markern nötig wird, um die Performance des Systems zu verbessern. Durch eine Wiederverwendung wäre auch gleichzeitig das Designproblem von Markern behoben, bei dem es gilt möglichst gut unterscheidbare Marker zu erstellen.

Alleine das Tracking in unpräparierten Umgebungen stellt ein unüberwindbares Problem für das markerbasierte Tracking dar, da diese Trackingtechnologie auf die zusätzlichen Markierungen in der realen Umgebung angewiesen ist.

Trotz der Probleme, die durch den Einsatz von markerbasiertem Tracking entstehen können, zeigt sich dessen Anwendungsbereich als vielfältig. Speziell weisen die Anwendungsfälle auf die Realisierung von Markerkombinationen und die Wiederverwendung von Markern hin, um die noch bestehenden Probleme zu bewältigen. Die Filterung von Orientierungs- und Positionierungsangaben ist ein weiterer Ansatzpunkt zur Beseitigung von Schwankungen.

In dem folgenden Abschnitt werden Filterungstechniken, Markerkombinationen und die Wiederverwendung von Markern genauer betrachtet.

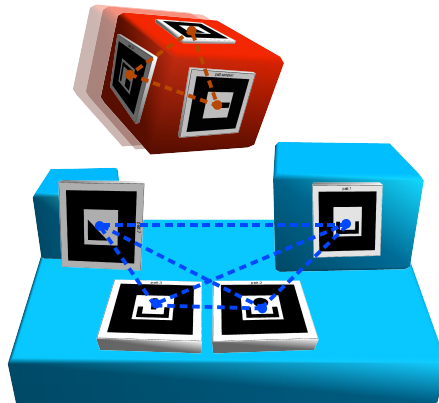


Abbildung 3.15: Markerkombinationen mit relativ statischer Ausrichtung

3.4 Vorüberlegung zur Kombination von Trackingquellen

Markerkombinationen sollen zum einen eingesetzt werden, um die Trackinginformation von verdeckten Markern rekonstruieren zu können, zum anderen um die Schwankungen in der Orientierungs- und Positionierungsangabe der einzelnen Marker auszugleichen. Um diese Funktionalität zu erreichen, können nicht beliebige Marker kombiniert werden. Bei Markern deren relative Ausrichtung zueinander unbekannt ist, kann bei der Verdeckung eines Markers die Trackinginformation des Anderen nicht rekonstruiert werden. Zwischen den Markern einer Kombination muss eine wohldefinierte Beziehung bestehen, die die relative Orientierung und Positionierung unter den einzelnen Markern bestimmt. Marker die sich relativ zueinander bewegen, können somit nicht zu einer Kombination zusammengefasst werden, da die wohldefinierte Beziehung zwischen den Markern durch die Bewegung verloren geht. [Abbildung 3.15](#) zeigt solche Marker, die nur teilweise kombiniert werden können, da sich die Marker am roten Quader bewegen.

Doch sind Marker relativ zueinander unbewegt, also relativ statisch, kann diese relative statische Orientierung und Positionierung verwendet werden, um die Orientierungs- und Positionierungsangaben von verdeckten Markern zu rekonstruieren. Wie in [Abbildung 3.16](#) wird durch die relative Orientierung und Positionierung zwischen den Markern, der so genannte Offset, die Darstellung eines virtuellen Würfels auch bei der teilweisen Verdeckung des Markers ermöglicht.

Kato et al. [[KBP⁺00b](#)] verwenden ein Markerfeld, dass in [Abbildung 3.18](#) zu sehen ist, wobei die einzelnen Trackinginformation der Marker so kombiniert werden, dass sie eine Transformation in ein einheitliches lokales Koordinatensystem beschreiben. Den Positions- und Orientierungsangaben der einzelnen Marker wird dazu eine Transformation, die dem Offset zum lokalen Koordinatenursprung entspricht, hinzuge-rechnet, so dass die Positions- und Orientierungsangaben der einzelnen Marker, denselben Ursprung in einem lokalen einheitlichen Koordinatensystem beschreiben (siehe [Abbildung 3.183.17](#)). Die Trackinginformationen der einzelnen Marker lässt sich mit Hilfe des inversen Offset des jeweiligen Markers bestimmen.

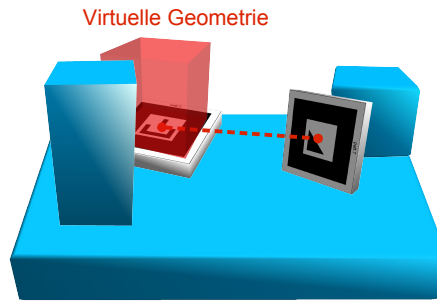


Abbildung 3.16: Rekonstruktion durch Offsetkombination

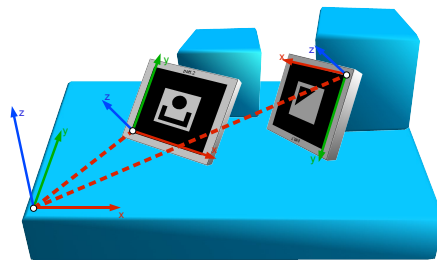


Abbildung 3.17: Lokales einheitliches Koordinatensystem

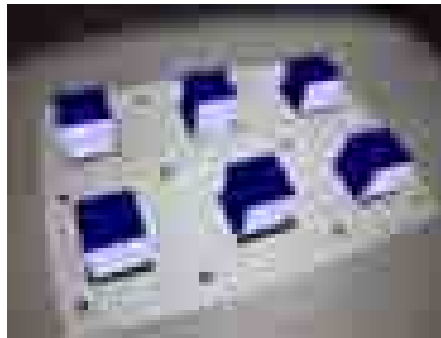
Bei dem Einsatz eines virtuellen Notizblocks („Virtual Shared White Board“ siehe [Abbildung 3.18\(e\)](#)) durch Kato und Billinghurst [KB99] in einem AR-Konferenzsystem, wird ebenfalls ein Markerfeld verwendet, dessen Trackinginformationen der einzelnen Marker zu einer einheitlichen Trackinginformation kombiniert wird, wodurch die Verdeckung einzelner Marker des Feldes durch die Trackinginformation der anderen ersetzt werden kann.

Diese Art der Vereinigung von Markern wird auch von Barattoff et al. [BNR02] verwendet um die Strömungsdynamik im Flugzeuginnenraum zu visualisieren, wobei die Strömungsverhältnisse durch virtuelle Partikelströme im Flugzeuginnenraum angezeigt werden. Sie verwenden beim problematischen Tracking im realen Flugzeug (im Model ist der Einsatz eines gut kalibrierten elektromagnetischen Trackingsystems möglich) eine Kombination von Markern. Im Flugzeug wird eine Vielzahl von Markern montiert, die anschließend durch eine Kalibrierung zu einem einheitlichen Koordinatensystem vereint werden.

Ledermann et al. [LRS02] verwenden das Prinzip des statischen Offset zwischen Markern, für das Tracking mit mehreren Kameras, die aus unterschiedlichen Perspektiven Bilder der Szene produzieren. Ist dabei ein Marker aus einer Kameraperspektive verdeckt, kann dessen Trackinginformation berechnet werden, sofern die Verdeckung aus einer anderen Perspektive behoben ist (siehe [Abbildung 3.19\(a\)](#)). Der Offset zwischen den Markern ist dabei nicht statisch, allerdings ist er für jeden Zeitpunkt der Aufnahme für beide Kameraperspektiven gleich. Dadurch kann die Trackinginformation des ver-



(a) Das Markerfeld



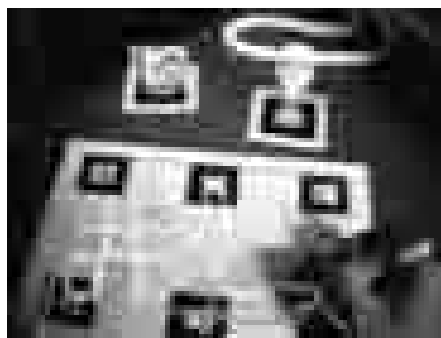
(b) Markerfeld mit virtuellen Würfeln



(c) Virtuelle Darstellung trotz Verdeckung



(d) AR-Konferenzsystem



(e) Markerfeld als virtueller Notizblock

Abbildung 3.18: Einsatz von Markerfeldern [KB99, KBP⁺00b]



(a) Prinzip der dynamischen Offsetbestimmung



(b) Beispiel der Markerverdeckung



(c) Beispiel der Markerverdeckung

Abbildung 3.19: Markerverdeckung bei mehreren Kameras [LRS02]

deckten Markers mit Hilfe eines weiteren Referenzmarkers berechnet werden, der zum einen die Bestimmung der relativen Positionierung der beiden Kameras ermöglicht, und zum anderen mit Hilfe des Offset zwischen den beiden Markern, sich die Markerposition trotz der Verdeckung in einem Kamerabild berechnen lässt.

3.5 Vorüberlegung zur Wiederverwendung von Markern

Im [Abschnitt 3.3](#) wurde bei Anwendungen mit großen Trackingbereichen festgestellt, dass dabei eine Vielzahl von Markern zum Einsatz kommen muss, um den kompletten Bereich abdecken zu können. Die einzelnen Marker müssen dabei vom System eindeutig identifiziert werden können, um deren Trackinginformation richtig zuordnen zu können. Es wurde festgestellt, dass die Performance des Systems eine Beschränkung der Anzahl von Markern erzwingt, da der Aufwand der Identifizierung der Marker auch mit der Anzahl der Marker wächst.

Zhang et al. [ZFN02] belegen diese Feststellung, indem sie die markerbasierten Trackingsysteme wie IGD (das in ARVIKA Projekten [ARV04] genutzt wird), das Siemens Corporate Research Marker System und das Hoffman Marker System betrachten und dabei eine Beschränkung von ca. 10.000 verwendbaren Markern feststellen. Die Marker

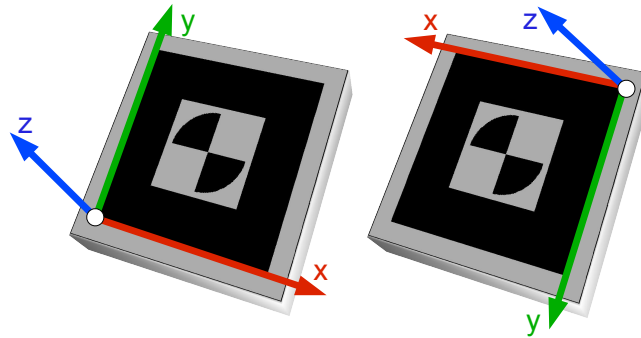


Abbildung 3.20: Bei symmetrischen Markern kann es zur zweideutigen Orientierungsinformationen kommen

dieser Systeme besitzen dabei ein jeweils festgelegtes Muster, das nicht angepasst werden kann. Das ARToolKit System [KBP00a], das ebenfalls von Zhang et al. [ZFN02] betrachtet wird, kann hingegen variable Muster verwalten, die allerdings aus Performancegründen nicht in beliebiger Anzahl zur Anwendung kommen.

Bei variablen Markermustern kommt zu dem Performanceproblem auch noch das Problem des Designs der Muster hinzu. Die Muster müssen auch unter widrigen Umständen gut vom System erkannt und unterschieden werden können. Widrige Umstände können dabei beispielsweise schlechte Lichtverhältnisse sein, wodurch die Marker falsch erkannt werden, oder große Abstände zwischen Kamera und Marker, wodurch die Abbildung des Markers im Videobild nur einen Bereich von wenigen Pixeln einnimmt. Owen et al. [OXM02] stellen speziell dazu verschiedene Kriterien für das Design von Markern auf. Ein Kriterium ist dabei die eindeutige Bestimmung der Position und Orientierung des Markers, die beispielsweise bei bestimmten symmetrischen Mustern nicht gegeben ist (siehe [Abbildung 3.20](#)). Das Design gut unterscheidbarer Marker ist nicht trivial und bei einer großen Zahl von Markern um so schwieriger, wie es Kalkusch et al. [KLK⁺02] bei ihrer Navigationsanwendung feststellen.

Eine Wiederverwendung von Markern würde die Probleme der Performance und des Designs umgehen, in dem die benötigte Anzahl von unterschiedlichen Markern verringert wird. Aus diesem Grund verwenden Kalkusch et al. [KLK⁺02] für das markerbasierte Tracking in einer MR-basierten Navigationshilfe, eine Wiederverwendung der Marker in vordefinierten Bereichen der Navigationsumgebung. Dabei wird der aktuelle Bereich, in dem sich der Anwender befindet, anhand der umgebenen Marker bestimmt. Für die Wiederverwendung von Markern werden die Bereiche dahingehend überprüft, ob sie aus anderen Bereichen einsehbar sind (siehe [Abbildung 3.21](#)). Zwei Bereiche die voneinander einsehbar sind, dürfen dann nicht die gleichen Marker verwenden, da dabei für einen doppelt genutzten Marker, nicht festzustellen ist, in welchem der beiden Bereiche sich der Marker befindet. Allerdings können in Bereichen die voneinander nicht einsehbar sind, die gleichen Marker verwendet werden, ohne ein Problem in der Zuordnung der Marker zu den Bereichen zu bekommen.

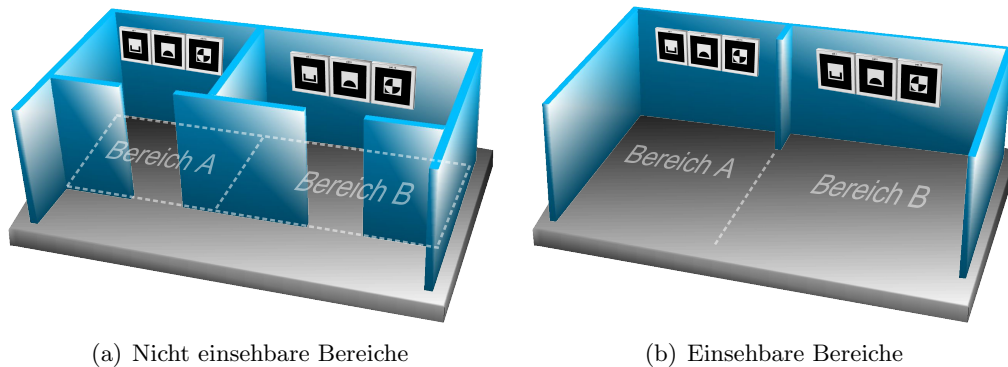


Abbildung 3.21: Wiederverwendung von Markern durch Bereichsunterteilung

Die Bestimmung der Einsehbarkeit der einzelnen Bereiche wird von Kalkusch et al. [KLK⁺02] allerdings mit Hilfe eines virtuellen Bauplans der Navigationsumgebung berechnet. Die Navigationsumgebung muss dazu komplett vermessen werden, genauso wie die Positionierung der Marker in dieser Umgebung.

3.6 Vorüberlegung zur Filterung von Trackinginformationen

Schwankende Abweichungen vom tatsächlichen Wert der Positionierung oder Orientierung beim Tracking, entstehen beispielsweise durch Stromschwankungen bei der elektromagnetischen Feldmessung, oder Dichteschwankungen in der Luft bei der Ultraschall-Lauflängenmessung. Beim bildorientierten Trackingverfahren werden Bildinformationen von Videokameras ausgewertet, wobei die einzelnen Bildpunkte einem geringen Rauschen unterliegen, die geringe Änderungen im Bild zur Folge haben. Dadurch können beispielsweise geringe Änderungen in der Kantendetektion entstehen, die dann wiederum Auswirkungen auf die Bestimmung von Orientierung und Positionierung eines Markers haben. Solche Schwankungen können durch verschiedene Filterungstechniken ausgeglichen werden, wie es schon in Abschnitt 3.3 „Anwendungsfälle und deren Auswirkungen auf das Tracking“ angesprochen wurde. Der Bereich der Filterung von Bewegungs-, Positions- oder Orientierungsangaben kann im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig betrachtet werden, da die Anwendungsmöglichkeiten vielfältig und die Techniken zur Filterung zahlreich sind. Trotzdem soll ein Einblick in einen Teil dieses Bereiches gegeben werden, um die Vielfältigkeit dieser Techniken ansatzweise zu verdeutlichen. Dazu werden speziell die so genannten Kalman-Filter betrachtet.

Der Kalman-Filter wurde 1960 von R. E. Kalman entwickelt und stellt eine effiziente, rekursive Lösung der systematischen Filterung dar. Welch und Bishop [WB97] heben den Kalman-Filter als ein sehr bedeutsames Werkzeug hervor, das eine Schätzung von Systemwerten ermöglicht. Der Kalman-Filter ist dabei eigentlich kein Filter, sondern ein

Algorithmus der den Zustand eines Systems, in Form eines Zustandsvektor $x \in \mathbb{R}^n$, mit Hilfe eines linearen Prozesses abschätzt und vorhersagt und gleichzeitig die Vorhersage anhand der Messwerte anpasst.

Der Prozess wird dabei durch eine lineare stochastische Gleichung ([Gleichung 3.1](#)) beschrieben, mit deren Hilfe der vorhergesagte Zustand des Systems x_{t+1} , mit Hilfe der so genannten Systemmatrix A_t , aus dem aktuellen Zustand x_t und dem Systemrauschen w_t , das die Schwankungen im System und auch regellose Störungen repräsentieren soll, berechnet werden kann. Es wird demnach eine Vorhersage des Zustandes zum Zeitpunkt $t + 1$ aufgrund des vorherigen Zustandes getätigt, unter Berücksichtigung von Fehlern in den beobachteten Werten und den Fehlern im System selbst.

$$x_{t+1} = A_t x_t + w_t \quad (3.1)$$

$$z_t = H_t x_t + v_t \quad (3.2)$$

- x_t Der Zustand des Systems zum Zeitpunkt t .
- A_t Die Systemmatrix, die eine Vorhersage ermöglicht und bei Messungen angepasst wird.
- w_t Das Systemrauschen, das Fehler und Ungenauigkeiten im System repräsentiert.
- z_t Ein Messwert, der zum Zeitpunkt t beobachtet wird.
- H_t Die Beobachtungsmatrix.
- v_t Das Beobachtungsrauschen, das durch Fehler in der Messung zu stande kommen kann.

Durch die Messungsgleichung ([Gleichung 3.2](#)) wird der vorhergesagte Zustand des Systems mit Hilfe der Beobachtungsmatrix H_t so gewichtet, dass der Messwert z_t unter der Berücksichtigung des Messrauschens erreicht wird.

Ziel der Filterung ist dabei, den Fehler zwischen der Vorhersage und der Messung möglichst klein zu halten, was durch die dynamische Anpassung der System- und Messungsgleichungen erreicht wird, wie es schematisch in [Abbildung 3.22](#) dargestellt ist. Dabei durchläuft der Filterungsprozess, nach der Initialisierung, immer wieder den Schritt der Vorhersage, bei der der Nachfolgezustand des Systems bestimmt wird. Steht in einem Schritt ein Messwert zur Verfügung, wird die Differenz zwischen Vorhersage und Messwert festgestellt und das System angepasst, damit die Vorhersage mit dem gemessenen Wert im Bereich der Fehlertoleranz liegt. Zu weiterführenden Information soll an dieser Stelle auf die Einführung in die Kalman-Filter von Welch und Bishop [[WB97](#)] verwiesen werden.

Diese Art der Filterung besitzt laut Welch und Bishop [[WB97](#)] im Bereich der Computeranwendungen große Vorteile, die sich auch in der Vielfältigkeit der Anwendungen widerspiegelt.

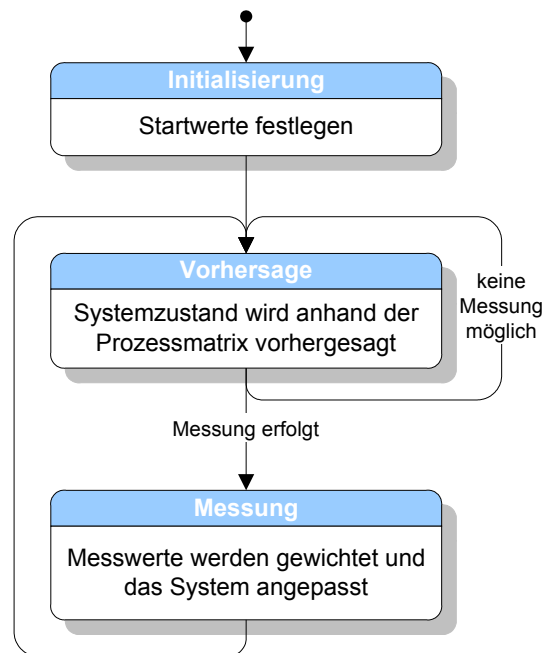


Abbildung 3.22: Berechnungsschritte bei der Kalman-Filterung

Azuma et al. [AHNS99] setzen beispielsweise einen Kalman-Filter zur Stabilisierung beim Outdoor-Tracking ein. Dabei werden die Orientierungsangaben eines Gyroskops und eines Kompasses gefiltert, um deren Schwankungen auszugleichen.

Koller et al. [KKR⁺97] filtern beispielsweise die Orientierungs- und Positionsangabe beim Kameratracking, durch Anwendung eines speziell erweiterten Kalman-Filters („Extended Kalman Filter“ beschrieben von Julier und Uhlmann [JU97], bei denen die lineare Filterung um einen nicht-linearen Ansatz erweitert wird). Dabei werden Winkelstellungen, Rotationsgeschwindigkeiten für die Orientierung und Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung für die Positionsbestimmung berücksichtigt. Messschwankungen der Trackingquellen werden dadurch eliminiert und eine Schätzung der Position und Orientierung wird beim Ausfall der Trackinginformation möglich.

Foxlin et al. [FHP98] setzen bei ihrem Ultraschall-Trackingsystem ebenfalls den Extended Kalman-Filter ein, um die Lauflängen der einzelnen Ultraschallsignale zu filtern.

Wan et al. [WvdM00] stellen den „Unscented Kalman-Filter“ vor, der demnach eine bessere Genauigkeit (geringer Abweichung vom tatsächlichen Wert) als der Extended Kalman-Filter erreicht und dabei mit vergleichbarer Komplexität arbeitet. Joseph J. LaViola Jr. [LaV03a] kommt bei seinem Vergleich zwischen Unscented und Extended Kalman-Filter, bei der Filterung von Orientierungsangaben beim Kopf- und Handtracking, zu einem anderen Ergebnis. Er stellt dabei eine nahezu gleiche Genauigkeit der Filterungen fest und favorisiert, wegen des geringeren Berechnungsaufwandes den Extended Kalman-Filter.

Joseph J. LaViola Jr. [LaV03b] stellt eine alternative Filterung zu den Kalman-Filtern vor, das so genannte Double Exponential Smoothing, das eine wesentlich höhere Performance, im Vergleich zu Kalman- und Extended Kalman-Filtern bietet (laut LaViola ca. 135-mal schneller).

Zusammenfassend kann man sagen, dass die verschiedenen Filtertechniken vielfältige Einsatzmöglichkeiten bieten, bei denen allerdings die Filter den Umständen angepasst werden müssen, um ein gutes Ergebnis zu erzielen. Der Einsatz der vorgestellten Kalman-Filter ermöglicht, außer der Eliminierung von Schwankungen in Messwerten, auch die Vorhersage von Messwerten. Der gezielte Einsatz der verschiedenen Filtertechniken setzt die Kenntnis von Eigenschaften der Techniken und auch der Eigenschaften der zu filternden Bewegung voraus.

3.7 Autorensysteme und Werkzeuge

Es soll nun festgelegt werden, welche Eigenschaften ein Autorensystem besitzen sollte und wie eine Autorenumgebung und deren integrierte Werkzeuge aussehen sollten. Dazu wird zunächst der Autor selbst betrachtet.

Gerade beim Einsatz von MR-basierten Anwendungen in fachfremden Bereichen, wie beispielsweise in der Medizin, werden Experten dieser Anwendungsbereiche (den so genannten Domänenexperten oder -spezialisten) in den Erstellungsprozess mit einbezogen, da deren Fachkenntnisse Grundvoraussetzung für die Erstellung der Anwendung ist. Ebenso werden Technikexperten benötigt, die über Wissen von MR-Technologien und deren Umsetzung verfügen. Im Erstellungsprozess kann das Wissen der verschiedenen Experten zusammengefasst werden, um dem Technikexperten die Erstellung der Anwendung zu ermöglichen. Abawi et al. [AD04] weisen darauf hin, dass dabei eine zeit- und kostenintensive Kommunikation zwischen Technik- und Domänenexperten realisiert werden muss, die zur Definition und Vermittlung der Aufgabengebiete der Anwendung dient, die dann von den Technikexperten umgesetzt werden müssen und nicht zuletzt auch zu Missverständnissen führen kann.

Abawi et al. [ADHZ04] weisen aus diesem Grund auf die Notwendigkeit verschiedener klar definierter Autorenrollen hin, die bei der Erstellung von MR-Anwendungen, durch die breite Streuung der Anforderungen, benötigt werden. Es werden Technikexperten benötigt, die über Implementierungs- und MR-technologische Fertigkeiten verfügen. Design Experten können zum Einsatz kommen, die über einen künstlerischen Hintergrund verfügen und Erfahrungen in der Modellierung und Gestaltung von virtuellen Inhalten besitzen. Außerdem werden Experten des Anwendungsgebietes benötigt, die über das Fachwissen aus dem Gebiet verfügen, in dem die MR-Applikation zum Einsatz kommen soll.

Die Aufteilung der Autorenrollen in Form einer, von Abawi et al. [AD04] beschriebenen Autorenpyramide (siehe [Abbildung 3.23](#)), ermöglicht dann eine Arbeitsaufteilung, bei der ein Domänenexperte (der an der Spitze der Pyramide angesiedelt ist) von den

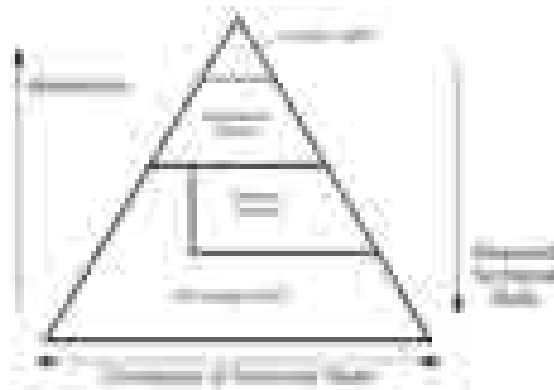


Abbildung 3.23: Autorenpyramide [AD04]

Ergebnissen der Technikexperten profitiert, ohne direkt bei der Umsetzung der Technikexperten einbezogen zu werden. Der Domänenexperte kann eigenständig, mit seinem Fachwissen die Anwendung erzeugen und dabei auf die Ergebnisse der Autoren zurückgreifen, die von ihm aus unterhalb in der Autorenpyramide angesiedelt sind.

Die Arbeitsaufteilung der Autorenrollen wird dabei durch den Einsatz von komponentenbasierten Anwendungsbausteinen ermöglicht, die von den Technikexperten implementiert werden, wobei diese Komponenten einen hohen Grad an Wiederverwendbarkeit und Flexibilität besitzen [ADHZ04]. Speziell die komponentenbasierte Softwareentwicklung erlaubt eine einfachere, schnellere und preiswertere Herstellung von Anwendungen mit Hilfe von vorgefertigten Halbfabrikaten bzw. Komponenten [Bal00].

Im Fall der MR-Softwareentwicklung können diese MR-Komponenten innerhalb eines Autorensystems für den Domänenexperte zur Verfügung gestellt werden, so dass er diese domänenunspezifischen Halbfabrikate zu einer Anwendung kombinieren und entsprechend der Aufgaben anpassen kann.

Der Entwicklungsprozess sollte dann, nach Abawi et al. [ADHZ04], schrittweise den Phasen der Qualifikation, Adaption, Kombination und Kalibrierung folgen, um dem Autor eine klar strukturierte Erstellung der MR-Anwendung zu ermöglichen (siehe [Abbildung 3.24](#) in der die ersten drei Phasen abgebildet sind).

Qualifikation In der Phase der Qualifikation ist es die Aufgabe des Autors die benötigten MR-Komponenten zu identifizieren, die in der MR-Anwendung zum Einsatz kommen sollen. Diese Komponenten werden bei Bedarf durch die MR-Experten implementiert oder angepasst.

Adaption In der Adaptionphase besteht die Aufgabe des Autors in der Anpassung der Komponenten, die dem Autor in Form von Bibliotheken zur Verfügung gestellt werden. Dazu werden vom Autorensystem Werkzeuge bereitgestellt, die diese Anpassung ermöglichen.

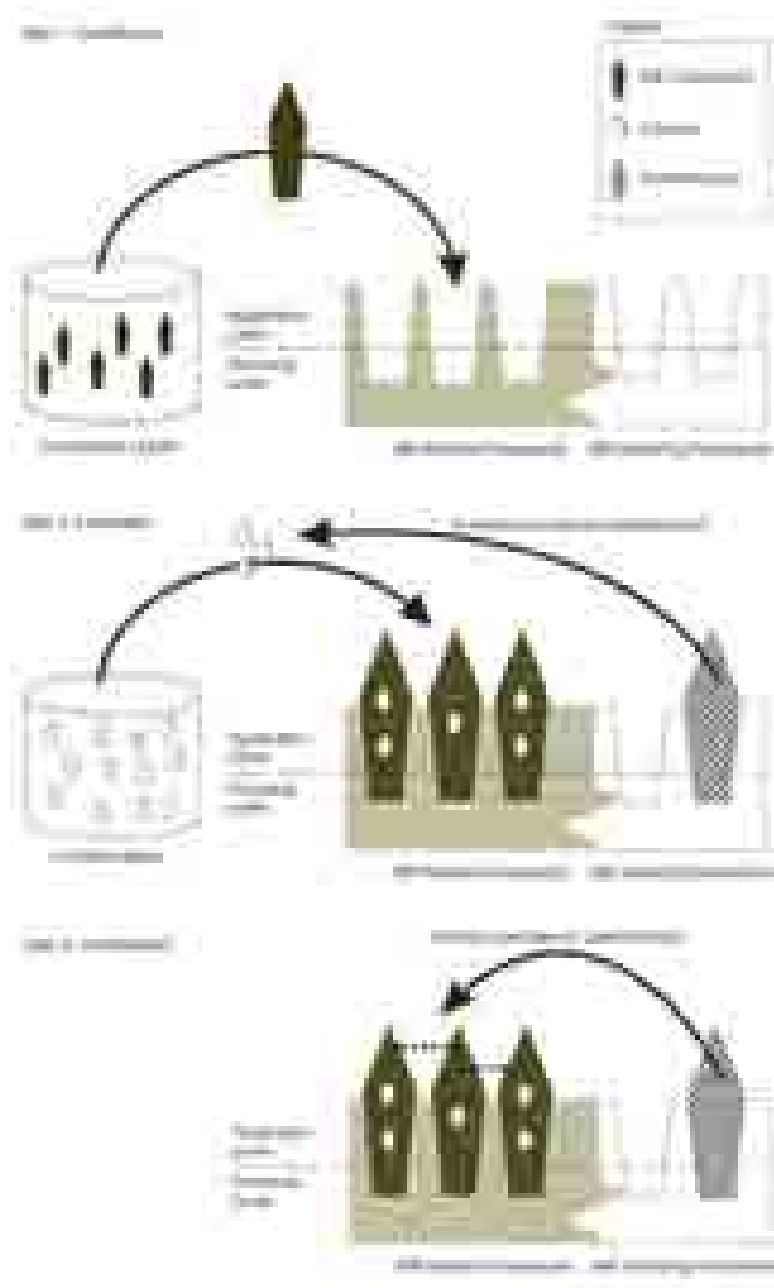


Abbildung 3.24: Erstellungsphasen [ADHZ04]

Kombination In der Kombinationsphase legt der Autor die Beziehungen zwischen den einzelnen Komponenten fest. Dazu bieten die einzelnen Komponenten Schnittstellen, die eine Interaktion untereinander ermöglichen.

Kalibrierung In der Phase der Kalibrierung findet die Ausrichtung von virtuellen und realen Objekten der MR-Anwendung statt.

Die Reihenfolge dieser Phasen kann dabei vom Autor variiert werden, wodurch auch bereits entwickelte Anwendungen den Anforderungen angepasst werden können, oder die Anwendung durch einen iterativen Verfeinerungsprozess ausgebaut werden können.

Der Entwicklungsprozess in solchen Phasen und der komponentenbasierte Ansatz zur Wiederverwendung von Halbfabrikaten setzt ein Autorensystem voraus, das zum einen während des Erstellungsprozesses eine Autorenumgebung mit verschiedenen Autorenwerkzeugen anbietet, und zum anderen ein Framework zu Grunde legt, dass den Einsatz der Komponenten ermöglicht.

Abawi et al. [AD04] stellen außerdem fest, dass bei der Entwicklung von MR-Anwendungen, eine MR-Autorenumgebung Vorteile bietet. Eine Realisierung der Anwendersicht (die so genannte Users View, womit die Funktionalität der Autorenumgebung gemeint ist, die es dem Autor ermöglicht die Sicht des Anwenders einzunehmen und zu simulieren), ermöglicht dann auch ein Testen der Anwendung aus Endanwendersicht, wodurch der Produktionsablauf bei der Erstellung einer Anwendung vereinfacht wird. Die Testphase bei der Produktion, kann durch den Einsatz der Users View in der Entwicklungsumgebung verkürzt werden.

Stellt sich nun die Frage, welche Funktionalität die aktuellen MR-Systeme bieten und wie speziell deren Unterstützung im Bereich der Wiederverwendung und Kombination von Trackingquellen aussieht. Hierzu sollen an dieser Stelle aktuelle Forschungsprojekte betrachtet werden, die auch im [Unterabschnitt 2.1.1](#) der Grundlagen vorgestellt werden.

Laut Dörner et al. [DGHP03] lenken beispielsweise die Projekte ARVIKA [ARV04], STAR [STA04a], STARMATE [STA04b], VRSUR [VRS04] und PISTE [PIS04] ihr Augenmerk nicht auf die strukturierte Erstellung von Anwendungen, die auf wieder verwendbaren Komponenten aufbaut und eine Autorenunterstützung bieten.

Die Projekte ART.LIVE [ART04], METAVISION [MET04], INTERFACE [INT04] und CHARISMATIC [CHA04] berücksichtigen die Unterstützung von Autoren bei der Erstellung von MR-Anwendungen, allerdings beschränken sich diese Projekte auf den Bereich der Erstellung von Bild- und Videobasierten Anwendungen, bzw. legen ihren Schwerpunkt in der Interaktionstechnik in Form von Avataren.

Abawi et al. [ADHZ04] stellen fest, dass bestehende MR-Systeme wie Studierstube [Stu04], DWARF (Distributed Wearable Augmented Reality Framework) [DWA04] oder Tinmith-evo5 (von Piekarski und Thomas [PT03] als Softwarearchitektur für 3D MR-Anwendungen vorgestellt), zwar einem komponentenbasierten Ansatz folgen, allerdings mangelt es bei den Systemen an Autorenwerkzeugen, die eine einfache Erstellung von MR-Anwendungen ermöglicht.

In den Projekten ARCHEOGUIDE [ARC04], LIFEPLUS [LIF04] und CREATE [CRE04] wird der Schwerpunkt, laut Abawi et al. [AD04], in der Lösung von technologischen Probleme gelegt.

Das AMIRE Projekt [AMI04b] (Authoring Mixed Reality) hebt sich von den anderen Projekten ab, da das Ziel dieses Projektes, die Entwicklung und Umsetzung von Konzepten ist, die es einem Personenkreis ermöglicht, der über kein spezielles MR-Expertenwissen verfügt, selbstständig MR-Anwendungen zu erstellen. In der Umsetzung der Konzepte wird auf bereits bestehende und durchaus bewährte technische Lösungen und Ansätze in MR-Bereich zurückgegriffen, und dabei auf die Integration solcher bestehenden Lösungen abgezielt. [ADHZ04, AD04, AMI04a]

Das Konzept des phasengestützten Autorenprozesses wurde speziell in diesem Projekt verwirklicht und der Einsatz von komponentenbasierten Entwicklungsbausteinen in der AMIRE-Entwicklungsumgebung ermöglicht. Dabei kommen wieder verwendbare Komponenten auf unterschiedlichen Granularitätsstufen zum Einsatz, die das verzahnte Zusammenspiel der unterschiedlichen Autoren in der Entwicklung ermöglicht. Die AMIRE-Autorenumgebung widmet sich mit den integrierten Entwicklungswerkzeugen, auch den verschiedenen Autorenrollen, mit ihren unterschiedlichen Fertigkeiten. Dabei ermöglicht der komponentenbasierte Aufbau der Autorenumgebung auch eine Erweiterung der integrierten Autorenwerkzeuge. [DGHP03, ADG⁺02, GHPR02]

Aufgrund dieser hervorragenden Eigenschaften der AMIRE-Entwicklungsumgebung, wird diese für die Implementierung der zu entwickelnden Konzepte herangezogen. Miedé [Mie04] trifft bei seiner Analyse von MR-Projekten die gleiche Wahl, wobei dessen Analyse detaillierter auf unterschiedliche Kriterien eingeht und aus diesen Gründen an dieser Stelle auch als Referenz angeführt werden soll.

Eine ausführlichere Einleitung in die AMIRE-Architektur und den zu Grunde liegenden Konzepten wird hierzu in [Kapitel 6](#) der Implementierung geboten. An dieser Stelle sollen nun speziell die AMIRE-Umgebung auf Lösungsansätze in den Bereichen des markerbasierten Tracking untersucht werden, die sich im vorhergehenden Abschnitt als problematisch herausgestellt haben.

Generell ist zunächst festzustellen, dass auch in der AMIRE-Architektur markerbasiertes Tracking zum Einsatz kommt und auch dort wegen der einfachen und flexiblen Einsatzmöglichkeit verwendet wird. In den Bereichen der Wiederverwendung von Markern, bietet diese Architektur allerdings keinerlei Problemlösungen oder Werkzeuge für den Autor an. Ansätze der Filterung zur Glättung von Orientierungs- und Positionierungsangaben, sind auf einfachste, allerdings problematische Weise realisiert. Die Trackingangaben, die in Form von Transformationsmatrizen vorliegen, werden dazu in ihren einzelnen Einträgen gefiltert. Was zu irregulären (nicht affine) Transformationsmatrizen führen kann. Für die Kombination von Trackingangaben unterschiedlicher Marker, wird ein Werkzeug angeboten, dass allerdings nur geringe Anpassungsmöglichkeiten für den Autor bietet.

3.8 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Im ersten Schritt der Analyse wurden verschiedenen Trackingtechnologien beschrieben und auf deren Vor- und Nachteile hingewiesen. Aufgrund vorher festgelegter Kriterien, wurden diese Technologien verglichen und bewertet, wodurch die Wahl des markerbasierten Tracking für den kostengünstigen, einfachen und flexiblen Einsatz, ermöglicht wurde. Anschließend wurde anhand verschiedener Anwendungsfälle von MR-Applikationen, zum einen die Anwendbarkeit dieser Trackingtechnologie unterstrichen, und zum anderen aber auch auf die Problembereiche des markerbasierten Tracking hingewiesen, wobei diese Problembereiche auf Lösungsansätze hin untersucht wurden. Diese Lösungsansätze konzentrierten sich dabei auf die Wiederverwendung von Markern, Filterung von Trackingangaben und Kombination von Markern.

Neben der Analyse von Trackingtechnologien wurden auch Konzepte von Autorensystemen und Autorenwerkzeugen betrachtet, um die Anforderungen an Autorenwerkzeugen bestimmen zu können. Dabei wurden die Vorteile eines strukturierten Autorenprozesses und die Vorteile der komponentenbasierten Softwareentwicklung hervorgehoben. Im Fall des strukturierten Autorenprozesses führt dies zu einer Aufteilung in verschiedene Autorenrollen, die eine konstruktive Verzahnung der einzelnen Aufgabengebiete der Autoren zur Folge hat. Im Fall der komponentenbasierten Softwareentwicklung, liegen die Vorteile in einer schnelleren und preiswerteren Herstellung von Anwendungen mit Hilfe von vorgefertigten Halbfabrikaten.

Bestehende MR-Systeme wurden daraufhin nach den Kriterien des strukturierten Autorenprozesses und dem Komponentenkonzept untersucht, wobei zunächst nach einer generellen Autorenunterstützung Ausschau gehalten wurde. Das AMIRE-Projekt und dessen Umsetzungen in Form der AMIRE-Autorenumgebung, hat sich dabei als alleiniger Kandidat herausgestellt, der diese Kriterien erfüllt. Die AMIRE-Autorenumgebung wurde aus diesem Grund für die spätere Implementierung der zu entwickelnden Konzepte ausgewählt.

Speziell deswegen, wurde die AMIRE-Autorenumgebung dahingehend untersucht, inwieweit dabei die Autorenunterstützung in den zuvor als problematisch erkannten Bereichen des markerbasierten Tracking, berücksichtigt wurde. Die dabei nicht vorhandenen oder unzureichenden Umsetzungen in der Autorenunterstützung im Bereich der Kombination von Markern, Filterung von Trackingangaben und Wiederverwendung von Markern, sind nun die Ausgangspunkte für die Entwicklung der Konzepte, die im folgenden Kapitel beschrieben werden.

Kapitel 4

Konzeption

In dem vorhergehenden Kapitel der Analyse, wurde die markerbasierte Trackingtechnologie als eine legitime Wahl für das Tracking in MR-Anwendungen dargestellt. Allerdings wurden auch Problembereiche des markerbasierten Tracking erkannt und auf die Lösungsansätze im Bereich der Kombination und Wiederverwendung von Trackingquellen, und im Bereich der Filterung von Trackingangaben hingewiesen, die in gängigen MR-Autorensystemen nur unzureichende Unterstützung finden.

In diesem Kapitel werden Konzepte vorgestellt, mit deren Hilfe die Entwicklung von Autorenwerkzeugen für das Anwenden von Filtertechniken, die redundante Markerkombination und die Wiederverwendung von Markern, ermöglicht wird.

Die Abschnitte „Markerkategorien“ und „Gütefunktion“ beziehen sich dabei auf das Tracking einzelner Marker, wobei der Abschnitt „Markerkategorien“ das Filtern von Trackingangaben behandelt. Die Abschnitte „Redundante Markerkombination“ und „Markertupel als Trackinginformation“ behandeln das Tracking mit Hilfe von Markerkombinationen, dabei wird speziell im Abschnitt „Markertupel als Trackinginformation“ das Konzept zur Wiederverwendung von Markern beschrieben. Zum Abschluss des Kapitels werden die wichtigsten Ergebnisse noch einmal kurz zusammengefasst.

4.1 Markerkategorien

Im Kapitel der Analyse wurde schon gezeigt, dass es zahlreiche Beispiele für den Einsatz von verschiedensten Filtertechniken, zur Verbesserung der Trackinginformation gibt. Koller et al. [KKR⁺97] filtert beispielsweise die Orientierungs- und Positionsinformationen beim Kameratracking, durch Anwendung eines speziellen „Extended Kalman Filter“. Dabei werden Winkelstellungen, Rotationsgeschwindigkeiten für die Orientierung, Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung für die Positionsbestimmung berücksichtigt. Messschwankungen der Trackingquellen werden dadurch eliminiert und eine Schätzung der Position und Orientierung wird beim Ausfall der Trackinginformation möglich.

Dabei stellte sich heraus, dass der Einsatz eines Filters zur Minderung der Positions- und Orientierungsschwankungen in der Trackinginformation, stark von den Eigenschaften der Trackingquelle abhängt. Eine unbewegte Trackingquelle mit starker Schwankung muss anders gefiltert werden, als eine stark bewegte Quelle. Die Schwankung darf im

Fall der unbewegten Quelle nicht als Bewegung der Quelle aufgefasst werden, und umgekehrt darf die Bewegung der dynamischen Quelle nicht als fehlerhafte Schwankung ausgefiltert werden.

Die verschiedenen Eigenschaften der Trackingquellen führen auch zu unterschiedlichen Filterungsansätzen, wie sie auch schon in der Analyse betrachtet wurden [BCC90, JU97, WvdM00, MC00, Zan01, LZ02, LaV03b]. Anhand der Eigenschaften einer Trackingquelle, die sich auf das Verhalten der Messwerte beziehen (darunter fallen beispielsweise die Stärke der Schwankung in den Messwerten), kann für die Trackingquelle eine anwendbare Filterungstechnik bestimmt werden.

Sollen solche Filterungstechniken dem Autor einer MR-Anwendung erschlossen werden, so muss, wie auch schon in der Analyse, im [Abschnitt 3.7](#) „Autorensysteme und Werkzeuge“ gezeigt wurde, auf dessen fehlenden fachspezifischen Kenntnisse Rücksicht genommen werden. Dem Autor soll trotz seiner fehlenden Kenntnisse die Möglichkeit gegeben werden Nutzen aus dem Bereich der Filterung von Trackingangaben zu ziehen. Dazu muss allerdings der Einsatz solcher Filterungstechniken und die Auswahl des Filters vereinfacht werden.

Das Konzept der Markerkategorien verfolgt diesen Ansatz, in dem die Marker zu einer Kategorie zusammengefasst werden, bei denen die zur Filterung entscheidenden Eigenschaften gleich sind. Für die verschiedenen Kategorien werden dann angepasste Filtertechniken angewendet, die den Eigenschaften der Trackingquellen entsprechen. Dadurch können gleichmäßigere Trackinginformationen erzeugt werden, wobei Schwankungen beseitigt werden, ohne die eigentliche Bewegung der Trackingquelle zu beseitigen. Es können kontinuierlichere Trackinginformationen erzeugt werden, indem Trackingunterbrechungen extrapoliert werden, wobei die Dynamik der Quelle berücksichtigt wird.

Der Autor ordnet einen Marker nur noch in eine Kategorie ein, und das anhand der Unterscheidungskriterien der einzelnen Kategorien, wodurch ihm die Zuordnung von Filtertechniken für die Trackingangaben des Markers abgenommen wird. Die gefilterten und extrapolierten Trackingangaben können dann dem Autor an einer Schnittstelle zur Verfügung gestellt werden, die die gleiche Funktionalität besitzt wie die Schnittstelle für die einfachen Trackingangabe eines Markers (siehe [Abbildung 4.1](#)). Dabei findet die Filterung und die Extrapolierung automatisiert im Hintergrund statt, sobald die Kategorie eines Markers bestimmt wurde.

Es stellt sich nun die Frage, welche Kategorien, bzw. welche Eigenschaften der Trackingquellen bei der Kategorisierung betrachtet werden sollen. Bei der Verwendung unterschiedlicher Trackingtechnologien können sich die Trackinginformation beispielsweise anhand folgender Eigenschaften unterscheiden.

Genauigkeit der Information: Verschiedene Trackingtechnologien bieten unterschiedlich genau Orientierungs- und Ortsangaben.

Fehleranfälligkeit der Information: Verschiedene Trackingtechnologien sind unterschiedlich störungsanfällig und unterscheiden sich in der Anzahl von produzierten Fehlmessungen.

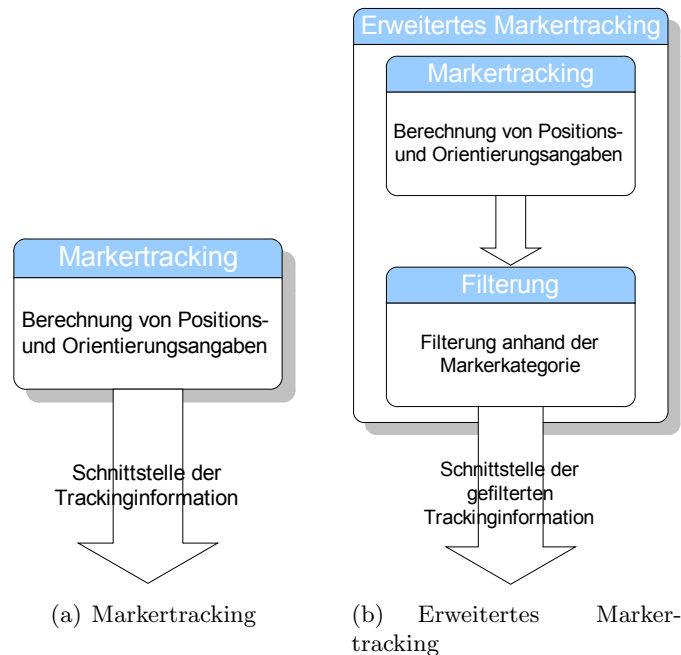


Abbildung 4.1: Schnittstelle beim Markertracking

Streuung durch Messschwankungen: Unterschiedliche Trackingtechnologien unterliegen unterschiedlich großen Schwankungen in der Orientierungs- und Ortsangabe, die durch Messschwankungen aufgerufen werden.

Zeitliche Kontinuität der Information: Trackingquellen können andauernde, kontinuierliche Informationen bieten (z.B. Elektromagnetische Tracker, bei denen Positionsangabe zu jedem Zeitpunkt abgefragt werden können). Der Strom der Trackinginformation kann auch zeitweilig abbrechen (z.B. durch Verdeckung beim markerbasiertem Tracking).

Das Konzept der Markerkategorisierung bezieht sich auf Trackingquellen gleicher Technologie, nämlich dem markerbasierten Tracking und betrachtet als Unterscheidungskriterien der Kategorisierung, die Eigenschaften der Trackingquellen, die sich auf deren Dynamik und Sichtbarkeit beziehen. Diese Kriterien ermöglichen sicherlich keine vollständige Beschreibung des Verhaltens von Trackingquellen, um daraufhin eine gut angepasste Filterungstechnik auswählen zu können. Allerdings kann anhand dieser Kriterien das allgemeine Prinzip dargestellt werden. Die Kriterien und Filtertechniken sind dabei austauschbar und können mit weiterführenden Kenntnissen im Gebiet der Filterung von Positions- und Orientierungsangaben angepasst werden.

Die Kriterien der Dynamik und des Erkennungsverhaltens von Markern werden dazu wie folgt unterteilt:

Dynamik der Trackingquelle: Dieses Kriterium unterteilt die Trackingquellen in unbewegte, gering bewegte oder stark bewegte Marker.

Erkennungsverhalten der Trackingquelle: Dabei wird die andauernde oder zeitweise unterbrochene Erkennung von Markern unterschieden.

Besitzt man Informationen über diese Eigenschaften der Quelle, können die Positions- und Orientierungsangaben, die durch das Tracking der Marker bestimmt werden, entsprechend behandelt werden. Fehlmessungen können dabei herausgefiltert werden. Schwankungen in der Positions- und Orientierungsangabe können geglättet werden. Andauernde Trackinginformationen können beim kurzzeitigen Abbrechen der Erkennung extrapoliert werden. [Tabelle 4.1](#) zeigt die Anwendungsmöglichkeiten der Filterung zu den einzelnen Kategorien. Dabei werden die Positions- und Orientierungsangaben von Marker extrapoliert, die in die Markerkategorien „mit andauernder Erkennung“ fallen. Die Trackinginformationen von Markern, die in die Kategorie der „zeitweise unterbrochenen Erkennung“ eingeordnet wurden, werden somit nicht extrapoliert, da sich diese Marker auch außerhalb des Sichtfeldes der Kamera aufhalten können. Die Dynamik der Marker hat eine unterschiedliche Filterung zur Folge, die bei stark bewegten Markern die Beschleunigung des Markers berücksichtigt, bei gering bewegten Markern nur die Geschwindigkeit und bei unbewegten Markern nur die Position der Marker.

Wenn ein Marker unbewegt ist, befindet er sich entweder andauernd im Sichtfeld der Kamera (und gehört somit der Kategorie „immer sichtbar und unbewegt“ an), oder er ist ständig außerhalb des Sichtfeldes der Kamera und bietet somit keine Trackinginformationen an. Diese Kombination von Eigenschaften tritt somit nicht auf.

Kriterium der Sichtbarkeit	Kriterium der Dynamik Unbewegt	Gering bewegt	Stark bewegt
Immer sichtbar	Extrapolierung; Filterung von Position und Orientierung	Extrapolierung; Filterung von Position und Orientierung, und Geschwindigkeit	Extrapolierung; Filterung von Position und Orientierung, Geschwindigkeit und Beschleunigung
Teilweise sichtbar	X	Keine Extrapolierung; Filterung von Position und Orientierung, und Geschwindigkeit	Keine Extrapolierung; Keine Filterung

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Markerkategorien

Die Kategorie einer Trackingquelle hat dann auch Auswirkungen auf den Gütewert der erzeugten Trackinginformation und somit auf die automatische Kombination von

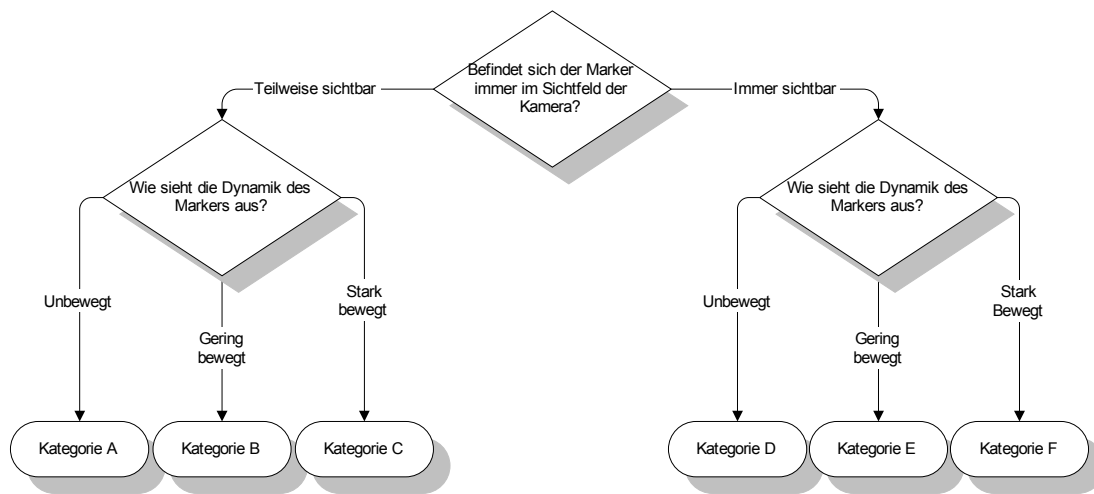


Abbildung 4.2: Entscheidungsverlauf bei der Markerkategorisierung

redundanten Trackinginformationen. Je restriktiver die Filterung der Trackinginformation ist, desto weniger Schwankungen unterliegt sie und erhöht somit die Qualität der Information.

4.1.1 Hilfestellung bei der Kategorisierung

Mit Hilfe der Kategorisierung von, kann es dem Autor einer MR-Anwendung ermöglicht werden verschiedenen Filterungstechniken zum Einsatz zu bringen, ohne dass er dabei genauere Kenntnisse über die einzelnen Filtertechniken besitzen muss. Das Problem der Zuordnung von Filterungstechniken hat sich somit für den Autor auf die Ebene der Zuordnung von Markern in die Kategorien verlagert. Dabei ist die Bestimmung einer passenden Kategorie für eine Marker eventuell für den Autor auch nicht eindeutig, da die Kriterien der Kategorien dem Autor beispielsweise nicht bekannt sind, oder auch die dynamischen Eigenschaften des Markers, die für eine Zuordnung benötigt werden.

Eine Hilfestellung sollte in diesen Fällen bereit stehen, die die Zuordnung der Marker in die Kategorien erleichtert. Dem Autor sollen die Unterscheidungskriterien der Kategorien verdeutlicht werden. Er kann dann selbst entscheiden, ob der Marker die Kriterien erfüllt und bekommt anschließend eine Kategorie vorgeschlagen. Der Ablauf einer solchen Bestimmung der Kategorie ist in [Abbildung 4.2](#) dargestellt.

Selbst die Entscheidung ob ein Kriterium erfüllt wird oder nicht, ist meistens nicht offensichtlich. Dazu ist beispielsweise die Frage zu klären, ob eine Quelle eher gering oder stark bewegt ist. Es sollte dafür ein Verfahren angeboten werden, dass selbstständig überprüft, ob ein Kriterium erfüllt wird oder nicht. Der Autor sollte bei der Bestimmung der Kategorie dazu die „User’s View“ einnehmen können, um aus Anwendersicht das Trackingverhalten simulieren zu können. Das System überwacht dabei das Verhalten der Trackingquelle über einen gewissen Zeitraum und stellt anhand der Positionierungs- und Orientierungsangaben fest welche Kriterien erfüllt werden.

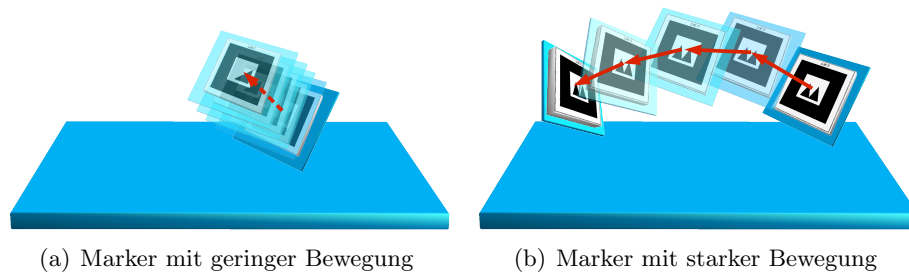


Abbildung 4.3: Überwachung der dynamischen Eigenschaften des Markers

Für das Kriterium der Dynamik können die Positions- und Orientierungsänderungen innerhalb des Überwachungszeitraums betrachtet werden, und für das Kriterium des Erkennungsverhaltens kann der zeitliche Verfügbarkeit der Trackinginformation eines Markers überwacht werden. Ändern sich die Positions- oder Orientierungsangaben in einem bestimmten Zeitraum nur gering (wie es in [Abbildung 4.3\(a\)](#) dargestellt wird), so kann man dem Marker in die Eigenschaft der „geringen Bewegung“ zuordnen. Bei größeren Positionsänderungen, wie in [Abbildung 4.3\(b\)](#) dargestellt, kann der Marker in die Eigenschaft der „starken Bewegung“ zugeordnet werden. Anschließend kann aufgrund dieser zugeordneten Eigenschaften eine Kategorie vorgeschlagen werden, die dem Verhalten des Markers entspricht.

4.2 Gütefunktion

Beim markerbasierte Tracking werden künstliche Markierungen an realen Objekten montiert, um anhand dieser Marker die Position und Orientierung der Objekte feststellen zu können. Diese Positionierungs- und Orientierungsangaben unterliegen, laut Davis et al. [DCR03], Schwankungen, Fehlern und Ungenauigkeiten, die unter anderem auf das Rauschen in der Bildinformation zurückzuführen sind. Malbezin et al. [MPT02] betrachten aus diesem Grund die Genauigkeit von Positionsangaben beim markerbasiertem Tracking und stellen dabei Abhängigkeiten zwischen der Genauigkeit der Positionsangabe und dem Abstand, sowie der Orientierung des Markers zur Kamera fest. In bestimmten Bereichen der Ausrichtungen des Markers ist beispielsweise die Abweichung des realen Abstandes vom berechneten Abstand größer.

Es wäre von Vorteil ein Maß für solche Ungenauigkeiten zu besitzen um die Qualität der Information einschätzen zu können. Die Gütefunktion soll genau dies realisieren. Sie dient als Maß für die Qualität der erzeugten Orientierungs- und Positionierungsangaben einer Trackingquelle und kann von verschiedenen Parametern abhängig sein. Da beispielsweise beim markerbasiertem Tracking eine Abhängigkeit zwischen der Genauigkeit und der Orientierung, bzw. dem Abstand zur Kamera besteht, sollten diese Werte als Parameter in die Gütefunktion eingehen.

Mit Hilfe der Gütefunktion kann die Qualität der Trackingangaben verschiedener Trackingquellen verglichen werden, um beispielsweise ein Entscheidungskriterium zu besitzen, mit dem beim Kombinieren von Trackingquellen die qualitativ hochwertigere Trackingangabe bevorzugt werden kann. Genau diese Funktionalität der Gütefunktion wird im [Abschnitt 4.3](#) verwendet um beispielsweise eine Gewichtung von Trackingangaben einer Kombination von Markern durchführen zu können.

Es stellt sich nun die Frage, wie die Qualität einer Trackingangabe festgestellt werden kann. Um ein Urteil über die Qualität zu fällen, können verschiedenen Eigenschaften der Trackingquellen betrachtet werden. Darunter fallen auch die folgenden Eigenschaften:

Granularität der Trackingangabe: Trackingquellen geben Angaben über die Position und Orientierung eines Objektes in verschieden dimensionierten Bereichen von beispielsweise Millimetern, Zentimetern oder Metern. Das Auflösungsvermögen der Quelle kann als Qualitätsmerkmal betrachtet werden.

Fehleranfälligkeit der Trackingquelle: Trackingquellen produzieren eventuell ausreißende Positionierungs- und Orientierungsangaben, durch Fehlfunktionen der Quelle. Mit welcher Wahrscheinlichkeit solche Fehler auftreten, kann als Qualitätsmerkmal betrachtet werden.

Schwankungen der Trackingangaben: Durch geringe Schwankungen in der Messung von Positions- und Orientierungsangaben bewegen sich diese Werte um einen gemeinsamen Mittelwert. Die Größe dieser Schwankung kann als Qualitätsmerkmal betrachtet werden.

Diskrepanz der Trackingangabe: Aufgrund von schlecht kalibrierten Trackingsystemen können die Trackingangaben einer Quelle eine Differenz zwischen realen und gemessenen Werten aufweisen. Die Größe der Diskrepanz kann als Qualitätsmerkmal betrachtet werden.

Sichere Identifizierung der Trackingquelle: Beim markerbasierten Tracking müssen die Trackinginformationen, die aus einem Marker gewonnen wurden, auch diesem Marker zugeordnet werden. Wenn diese Identifizierung der Marker fehlerhaft ist, werden falsche Positions- und Orientierungsangaben von einem Marker erzeugt. Ein Qualitätsmerkmal kann dabei die Sicherheit des Systems sein, mit der es die Trackingquellen identifiziert.

Für das markerbasierte Tracking, das in dieser Arbeit im Vordergrund steht, werden zur Bestimmung der Güte, die Eigenschaften der Identifizierungssicherheit, die Diskrepanz und die Schwankung von Positionierungs- und Orientierungsangaben betrachtet. Dazu müssen Maße bestimmt werden, die in Bezug auf die einzelnen Eigenschaften, die Qualität der Trackinginformation widerspiegeln.

Für den Fall der Identifizierungssicherheit muss das Trackingsystem einen Wert bereitstellen, der die Sicherheit der Markeridentifizierung repräsentiert. Im markerbasierten Trackingsystem vom ARToolKit [[KBP00a](#)] wird dies mit Hilfe des so genannten

„Confidence Value“ geleistet, der einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen kann, wobei bei einem Confidence Value von 1, das System eine sichere Identifizierung des Markers annimmt.

Die Diskrepanz in Positionierungs- und Orientierungsangaben kann vom Trackingssystem nicht selbst erkannt werden. Dazu müssen Messungen durchgeführt werden, bei denen die reale Orientierung und Positionierung bestimmt wird, die dann mit den erzeugten Werten des Trackingsystems verglichen werden können. Die Schwankung der Positionierungs- und Orientierungsangaben können ebenfalls mit Hilfe von Messungen festgestellt werden. Dazu kann die stochastische Größe der Standardabweichung einer Messreihe verwendet werden, die ein Maß dafür ist, wie breit die Streuung der Messwerte um den Mittelwert ist.

Die Diskrepanz in Positionsangaben ist, laut Malbezin et al. [MPT02], vom Markerabstand und von der Ausrichtung des Markers zur Kamera abhängig. Eine Aufteilung in Bereiche, in denen die Diskrepanz der Trackingangabe noch gering ist und in Bereiche in denen die Diskrepanz der Trackingangaben zunimmt, hätte zur Folge, dass nach der Festlegung der Bereiche, eine Zuordnung einer Trackingangabe mit geringer Diskrepanz, anschließend nur mit Hilfe des Abstand und der Orientierung ermöglicht wird.

Die Kategorie einer Trackingquelle, wie sie im [Abschnitt 4.1](#) beschrieben wird, kann ebenfalls Auswirkungen auf den Gütewert der erzeugten Trackinginformation haben. Je restriktiver die Filterung der Trackingangaben ist, desto weniger Schwankungen unterliegen die Positionierungs- und Orientierungsangaben der Trackingquelle und desto höher ist die Qualität der Trackinginformation einzuordnen.

4.3 Redundante Markerkombination

Das markerbasierte Tracking besitzt große Vorteile die in der einfachen und kostengünstigen Anwendbarkeit der Technologie begründet sind. Allerdings entstehen auch durch den Einsatz von markerbasiertem Tracking Einschränkungen, die im [Abschnitt 3.3](#) „Anwendungsfälle und deren Auswirkungen auf das Tracking“ betrachtet werden. Durch das eingeschränkte Sichtfeld der Videokamera kann ein Marker nicht immer erfasst werden und die von der Erfassung abhängige Bestimmung von Positionierungs- und Orientierungsangaben kann somit nicht durchgeführt werden. Das Tracking kann ebenfalls durch Verdeckung des Markers, oder auch durch schlechte Lichtverhältnisse verhindert werden. Wird nur die Trackinginformation eines einzelnen Markers verwendet, kann ein kontinuierliches Tracking, durch diese Umstände, nicht gewährleistet werden. Der Anwendungsfall des Orbiting (der dynamischen Betrachtung eines Objektes von verschiedensten Perspektiven) stellt ein Beispiel dar, bei dem ein kontinuierliches Tracking vorausgesetzt wird, wobei im [Abschnitt 3.3](#) festgestellt wird, dass diese Anwendung durch einen einzelnen Marker nicht realisiert werden kann. Eine Kombination von Markern würde diese Funktionalität ermöglichen.

Foxlin und Naimark [FN03] zeigen, dass durch das Kombinieren von Trackingquellen,

eine kontinuierliche Trackinginformationen erzeugt werden kann. Sie zeigen auch, dass dadurch ein Einsatz in größeren Maßstäben ermöglicht wird (Wide Area Tracking), dass das Problem von variierenden Lichtverhältnissen und Verdeckungen von Markern, in den Hintergrund tritt, sofern eine Kombination aus mehreren Trackingquellen verwendet wird.

Durch das Kombinieren von Markern kann also ein kontinuierliches Tracking ermöglicht werden, wenn sich dabei die Trackingangaben der einzelnen Marker zu einer kontinuierlichen Information ergänzen. Sollen Marker kombiniert werden, müssen sie eine wohldefinierte relative Positionierung und Orientierung (den so genannten Offset) untereinander besitzen, wie es in [Abschnitt 3.4](#) ausgeführt wird. Beim Ausfall einer Trackingquelle, kann dessen Trackinginformation durch die anderen Quellen übernommen werden, unter Berücksichtigung der relativen Positionierung. Da die Marker einer Kombination eine relativ starre Ausrichtung zueinander besitzen, können die Trackingangaben mit Hilfe eines Offset für jeden einzelnen Marker, zu einem einheitlichen Koordinatensystem vereint werden, wie es in [Abbildung 3.17](#) dargestellt ist. Wird also der jeweilige Offset mit den Trackingangaben der einzelnen Marker kombiniert, erhält man redundante Trackinginformationen, die den Ursprung des einheitlichen Koordinatensystems beschreiben.

Eine solche Kombination redundanter Trackinginformationen ermöglicht auch eine Verbesserung der Positionierungs- und Orientierungsangaben beim Tracking, die wie schon in [Abschnitt 4.2](#) beschrieben, Schwankungen unterliegen. Dabei können die Trackingangaben der einzelnen Marker so kombiniert werden, dass die Schwankungen in Positionierungs- und Orientierungsangaben der einzelnen Trackingquellen weniger ins Gewicht fallen.

Sollen solche Markerkombinationen dem Autor einer MR-Anwendung zur Verfügung gestellt werden, so muss auf dessen spezielle Kenntnisse Rücksicht genommen werden. Im [Abschnitt 3.7](#) „Autorensysteme und Werkzeuge“ wurde gezeigt, dass dem Autor trotz seiner eventuell fehlenden Kenntnisse im MR-Bereich die Möglichkeit gegeben werden soll die Vorteile der Markerkombinationen nutzen zu können. Eine Automatisierung bestimmter Abläufe würde dem Autor den Einsatz solcher Markerkombinationen erleichtern.

Das Kombinieren der Trackinginformationen sollte auf Grund dieser Überlegung im Hintergrund automatisiert ablaufen, wobei die kombinierte Trackinginformation dann an einer Schnittstelle präsentiert wird, die die Funktionalität der Schnittstelle vom Tracking einzelner Marker besitzt. Der automatisierte Ablauf ist dabei in [Abbildung 4.4](#) grob dargestellt. Der Autor kann dann mit einer kombinierten Trackinginformation weiterarbeiten und muss sein Augenmerk nicht darauf richten, welche Trackinginformationen von welchem Marker in der Kombination zur Verfügung stehen und wie diese Trackingangaben mit welchem Offset kombiniert werden müssen.

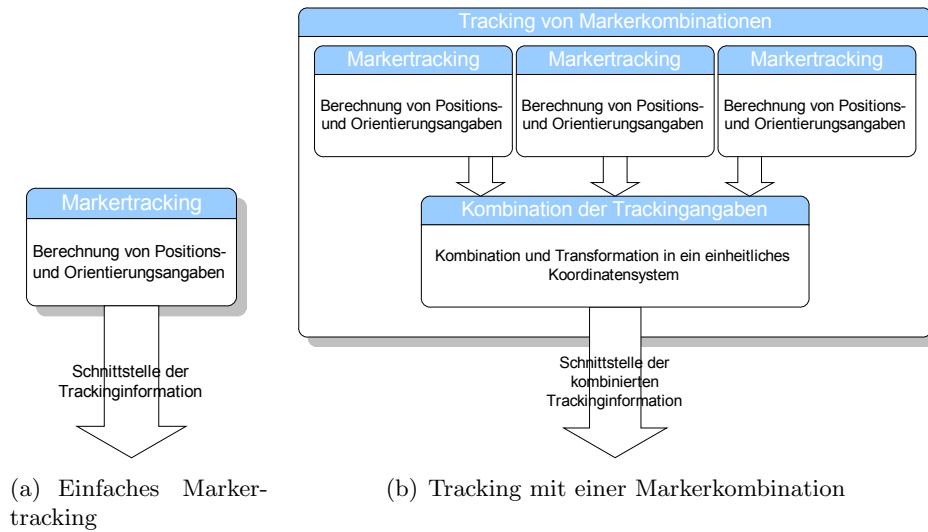


Abbildung 4.4: Schnittstelle beim Tracking einer Markerkombination

Es stellt sich nun die Frage, wie die Trackinginformationen automatisiert kombiniert werden sollen, wie der Autor bei der Erstellung und Anpassung solcher Kombinationen unterstützt wird und wie man den Autor speziell dabei unterstützt Kombinationen von Markern zu erstellen, die kontinuierliche Trackinginformationen produzieren sollen.

Der folgende [Unterabschnitt 4.3.1](#) „Automatisierte Markerauswahl“ widmet sich dem Problem der automatisierten Kombination und stellt dazu zwei Ansätze vor, die in Verbindung mit der Gütefunktion realisiert werden können. Der darauf folgende Abschnitt [Unterabschnitt 4.3.2](#) „Interaktives Kombinieren von Markern“ betrachtet die Unterstützung des Autors bei der Erstellung und Anpassung der Markerkombination, wobei auch speziell auf die Unterstützung bei der Erstellung von Kombinationen, die kontinuierliche Trackinginformation produzieren sollen, eingegangen wird.

4.3.1 Automatisierte Markerauswahl

Da das System das Kombinieren der einzelnen Trackinginformationen im Hintergrund ablaufen lassen soll, muss es selbstständig überprüfen, welche der Trackinginformationen zur Verfügung stehen, um anschließend zu entscheiden, ob eine Trackinginformation der Markerkombination erzeugt werden kann und welche der einzelnen Trackinginformationen dabei kombiniert werden sollen.

Die Trackinginformation der Markerkombination wird dann an einer bestimmten Schnittstelle, die die Nutzung dieser Angaben, in gleicher Art und Weise ermöglicht, wie die Schnittstelle der Trackinginformation einzelner Trackingquellen ermöglicht.

Die Marker besitzen dabei eine konstante relative Positionierung und Orientierung untereinander, die in der Kombination genutzt wird, um ein einheitliches Koordinatensystem mit Hilfe der Offsets zu beschreiben. Dabei stellt der Offset jedes Markers

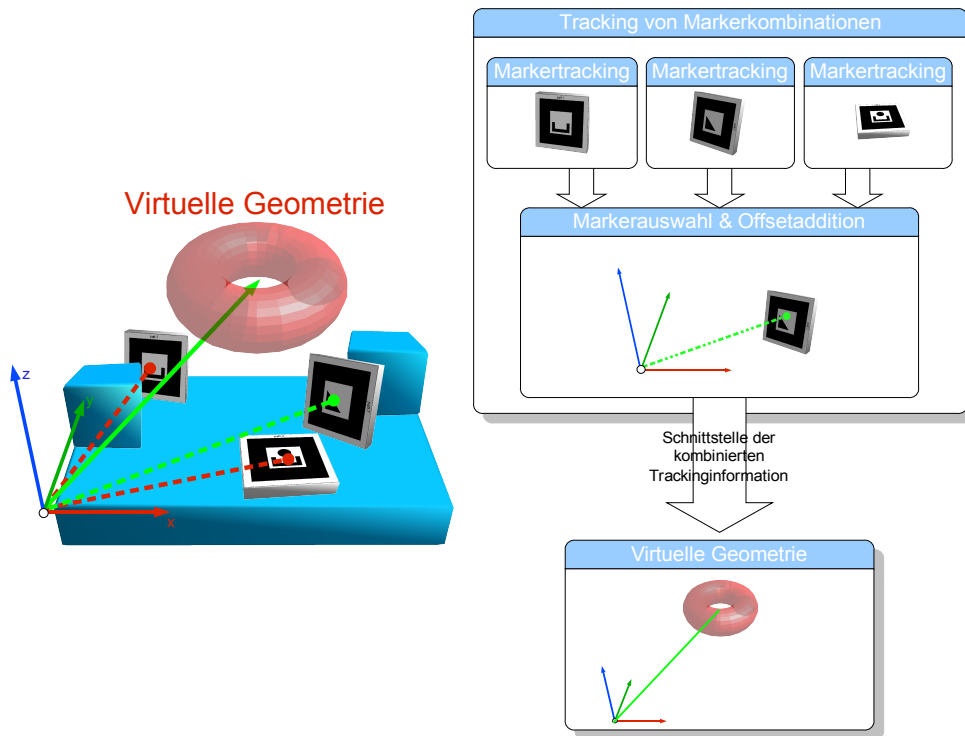


Abbildung 4.5: Automatische Markerauswahl

die Transformation zwischen diesem einheitlichen Koordinatensystem und dem Koordinatensystem des Markers dar, wie es in [Abbildung 3.17](#) dargestellt ist. Das System verwaltet diese Offsets und kombiniert sie mit den jeweiligen Trackinginformationen der Marker, sofern der jeweilige Marker im Videobild erkannt wurde.

Stehen in einer Markerkombination mehrere Trackinginformationen der einzelnen Marker zur Verfügung, können diese auf zwei verschiedene Arten behandelt werden. Zum einen kann die Trackinginformation eines Markers nach festgelegten Kriterien ausgewählt werden (wie es in [Abbildung 4.5](#) schematisch dargestellt wird), oder zum anderen können die Trackinginformationen der einzelnen Marker zur einer einheitlichen Information zusammengefasst werden. Bei der Wahl eines einzelnen Markers, aus mehreren, sollte der Marker mit der qualitativ hochwertigsten Trackinginformation ausgewählt werden. Bei der Vereinigung mehrerer Trackingquellen, sollten bessere Trackinginformationen auch ein höheres Gewicht bei der Vereinigung bekommen.

Für den Autor, der eine Markerkombination für das Tracking verwenden will, sind dann nur noch zwei Informationen entscheidend. Die eine Information ist dabei, ob mindestens ein Marker der Kombination eine Trackinginformation bietet, und somit die Kombination auch eine Trackinginformation produzieren kann. Die zweite Information die der Autor benötigt ist dann noch die kombinierte Trackinginformation. Diese beiden Angaben entsprechen auch den Angaben, die zum Tracking einzelner Marker benötigt werden.

Gütefunktion als Entscheidungskriterium

Bei dem automatisierten Kombinieren von Trackinginformationen innerhalb einer Markerkombination, wurden zwei verschiedene Vorgehensweisen beschrieben. Bei der einen Variante soll der Marker ausgewählt werden, dessen Trackingangaben die höchste Qualität bietet, um anschließend die einheitliche Trackinginformation mit Hilfe des Offset des Markers zu erzeugen (wie es in [Abbildung 4.5](#) dargestellt ist).

Bei der zweiten Variante der automatisierten Kombination der Trackinginformationen, wird nicht eine einzelne Trackingangabe ausgewählt, sondern alle Trackingangaben verwendet, wobei diese Angaben so kombiniert werden, dass die Trackinginformationen höher gewichtet werden, die eine höhere Qualität besitzen.

Wie dabei die Qualität der Trackinginformation zu beurteilen ist, wurde nicht genauer geklärt, schließlich ist es nicht offensichtlich, wie die Trackinginformationen verglichen werden können, um zu entscheiden welche der Informationen besser ist. Die Gütefunktion, die als Maß für die Qualität einer Trackinginformation eingeführt wurde, kann an dieser Stelle als Entscheidungskriterium verwendet werden. Der Erzeugte Gütewert kann zwischen den verschiedenen Trackinginformation verglichen werden und spiegelt die Qualität der Trackingangaben wieder, wie es im [Abschnitt 4.2](#) „Gütefunktion“ beschrieben wird. Der Gütewert der einzelnen Trackingangaben kann ebenfalls dazu verwendet werden, die Trackinginformationen gewichtet zu kombinieren. Somit steht ein Hilfsmittel zur Verfügung, das die Einschätzung der Qualität von Trackingangaben ermöglicht und somit auch eine sinnvolle automatisierte Auswahl innerhalb der Markerkombination ermöglicht.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die automatisierte Kombination von Markern den Einsatz von Markerkombination für den Autor wesentlich vereinfacht. Die Schnittstelle, die dann die Trackinginformationen einer Markerkombination anbietet, muss sich dabei nicht von der Schnittstelle für das Tracking einzelner Marker unterscheiden. Was in den folgenden Abschnitten noch geklärt werden muss, ist wie der Autor bei der Erstellung und Anpassung solcher Markerkombinationen unterstützt wird.

4.3.2 Interaktives Kombinieren von Markern

Es hat sich in der vorhergehenden Betrachtung als Vorteil herausgestellt, dass bei einer Markerkombination die eigentliche Auswahl oder Vereinigung von Trackingangaben automatisiert im Hintergrund stattfindet. Der Autor kann an der Schnittstelle der Markerkombination die erforderlichen Informationen über die Trackingangaben abfragen, ohne sich dabei die einzelnen Trackingangaben der Marker betrachten zu müssen.

Doch da dieses Kombinieren der Trackinginformationen im Hintergrund stattfindet, muss dem Autor eine Hilfestellung angeboten werden, die ihm einerseits die Erstellung, und andererseits die Erweiterung und Anpassung der Markerkombination ermöglicht. Damit kann der Autor die Markerkombinationen selbstständig an die Anforderungen der zu erstellenden Anwendung anpassen.

Zum einen sollte eine Markerkombination interaktiv mit zusätzlichen Markern erweitert werden können. Ebenfalls sollten bereits vorhandene Marker aus der Kombination entfernt werden können.

Die Markerkombination verwaltet zu jedem Marker einen Offset, der die Transformation zwischen dem Markerkoordinatensystem und dem einheitlichen Koordinatensystem beinhaltet. Die Bestimmung des Offset eines neueingefügten Markers, sollte ebenfalls automatisiert stattfinden. Der Autor muss sich somit auch beim Einfügen eines neuen Markers zur Kombination keine Gedanken über dessen relative Position und Orientierung zu den anderen Markern machen. [Abbildung 4.6](#) zeigt den Ablauf des interaktiven Einfügens, wobei die Offsetbestimmung des neu eingefügten Markers nur dann ermöglicht wird, falls mindestens ein Marker der Kombination Trackingangaben bietet. Ist der neu eingefügte Marker der erste der Kombination, so kann das einheitliche Bezugssystem für die Kombination beliebig gewählt werden. In der schematischen Abbildung wird das einheitliche Koordinatensystem so gewählt, dass es mit dem des ersten Markers übereinstimmt.

Da das Erweitern der Markerkombination auch fehlschlagen kann, wenn beispielsweise im Moment des Einfügens des neuen Markers keiner der schon eingefügten Marker Trackinginformationen anbieten kann, sollte der Autor auch eine Rückmeldung über den Erfolg oder Misserfolg der Erweiterung der Kombination bekommen.

Allerdings kann gerade dieses Problem nahezu behoben werden, in dem das Hinzufügen des neuen Markers über einen gewissen Zeitraum ausgedehnt wird. Die Prozedur wird solange unterbrochen, bis mindestens einer der schon hinzugefügten Marker wieder Trackinginformationen bietet. Bei einer solchen Ausdehnung der Einfügeprozedur, sollte der Autor ebenfalls über den Fortschritt informiert werden.

Eine Einfügeprozedur die sich über einen gewissen Zeitraum ausdehnt, wird allerdings auch keine Chance besitzen den neuen Marker einzufügen, wenn dieser so zu den bereits eingefügten Markern positioniert ist, dass nie einer der eingefügten Marker gleichzeitig mit dem neuen Marker im Videobild der Kamera sichtbar ist. Befinden sich beispielsweise alle Marker der Kombination auf der Oberseite einer Tischplatte, kann ein Marker der an der Unterseite der Tischplatte montiert ist, nicht zur Kombination aufgenommen werden, da immer nur eine der beiden Tischseiten sichtbar sind. Dieses Problem wird genauer im folgenden Abschnitt betrachtet.

Spezielle Orbitingunterstützung

Bei der Verwendung der redundanten Markerkombination kann ein kontinuierliches Tracking erwünscht und auch notwendig sein. Bestimmte Anwendungsszenarien, wie sie unter anderen auch in [Abschnitt 3.3](#) „Anwendungsfälle und deren Auswirkungen auf das Tracking“ betrachtet wurden, ermöglichen das dynamische Betrachten eines Gegenstandes (beispielsweise einer Statue in einem Museum) aus unterschiedlichsten Blickwinkeln. Sollen in Verbindung mit der Statue zusätzliche Informationen dargestellt werden, wie beispielsweise eine virtuelle Ergänzung eines fehlenden Teils der Statue, so muss das Tracking, das die Ausrichtung der virtuellen Darstellung ermöglicht, auch von allen Seiten der Statue garantiert werden.

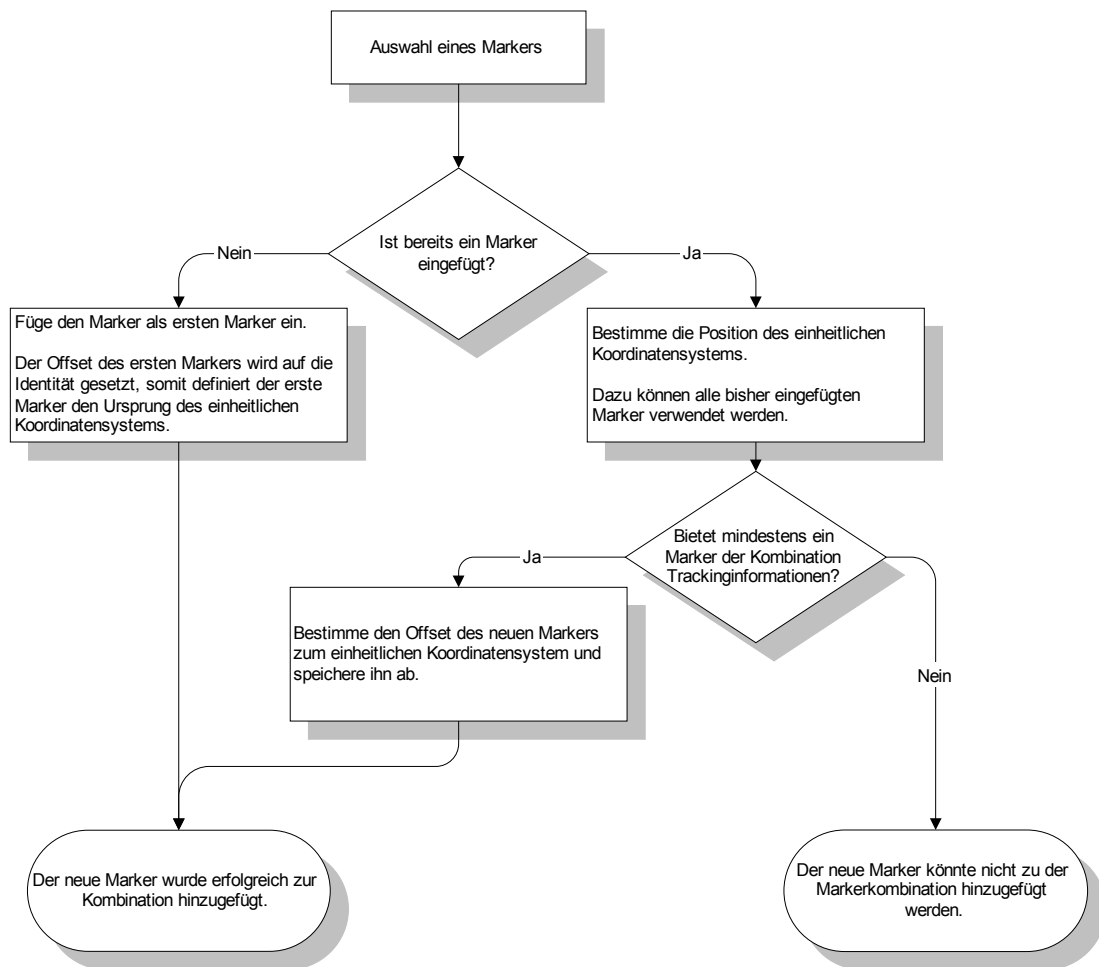


Abbildung 4.6: Ablaufschema des Einfügens eines Markers zur Markerkombination

Gerade beim markerbasierten Tracking können nur dann Trackinginformationen anhand eines Markers bestimmt werden, wenn keine Verdeckung des Markers vorliegt oder der Marker richtig zur Kamera ausgerichtet ist.

Das Konzept der Markerkombinationen ermöglicht, durch den Zusammenschluss der Trackinginformationen aus mehreren Markern, das Tracking in solchen Orbiting-Anwendungen. Allerdings müssen die Marker dafür so ausgerichtet werden, dass während der Anwendung aus verschiedenen Blickwinkeln mindestens ein Marker der Kombination von der Kamera erfasst werden kann.

Im Konzept der Markerkombinationen ist die interaktive Erweiterung der Kombination schon vorgesehen, so dass der Autor, der eine solche Orbiting-Anwendung erstellen muss, auch die Möglichkeit besitzt eine entsprechende Markerkombination herzustellen. Allerdings ist es auch für den Autor einer solchen Anwendung nicht immer offensichtlich wie dazu die einzelnen Marker der Kombination zu positionieren sind und an welchen Stellen eventuell weitere Marker erforderlich werden. Dem Autor sollte dazu eine Hilfestellung angeboten werden, die ihn dabei unterstützt. Der Autor sollte bei der Erstellung die Anwendersicht einnehmen können, um dabei aus Anwendersicht die verschiedenen Blickwinkel beim Orbiting überprüfen zu können.

Die Hilfestellung dabei soll darin liegen, dass der Autor darauf hingewiesen wird, wann er erkennt aus welchen Blickwinkeln die Qualität der Trackingangabe zu schlecht wird, oder sogar abbricht. Zur Bewertung der Qualität der Trackinginformation wird an dieser Stelle die Gütefunktion herangezogen, die ein Maß für die Qualität der einzelnen Trackinginformationen bietet (siehe dazu [Abschnitt 4.2](#)). Falls der Gütewert der einzelnen Trackinginformationen einen bestimmten Wert unterschreitet, sollte an dieser Stelle die Kombination um einen Marker erweitert werden. Zur Bestimmung solcher Schwachstellen sollte auch die Anzahl der Trackingquellen herangezogen werden, die unter den verschiedenen Blickwinkel Trackingangaben liefern. Steuert beispielsweise nur noch ein Marker Trackingangaben zur Kombination bei, sollte an dieser Stelle ebenfalls die Kombination erweitert werden. [Abbildung 4.7](#) zeigt den schematischen Ablauf, wie die Unterstützung aussehen sollte.

Sind solche Schwachstellen identifiziert worden, sollte der Autor auch eine Unterstützung bei der Beseitigung solcher Schwachstellen bekommen. Zu dem betrachteten Blickwinkel wird dem Autor bei der Positionierung eines weiteren Markers geholfen, so dass ein kontinuierliches Tracking an dieser Stelle ermöglicht wird. Diese Positionierung des neuen Markers kann dabei in der Art erfolgen, dass dem Autor eine Position des Markers vorgeschlagen und verdeutlicht wird, die einen hohen Gütewert der Trackinginformation dieses Markers verspricht. Der Autor kann allerdings auch selbstständig die Positionierung des Markers vornehmen und sollte dann allerdings dabei eine Rückmeldung bekommen, wie der Gütewert zur aktuellen Position des Markers aussieht. Liegt dieser in einem akzeptablen Bereich kann der Autor angewiesen werden, den neuen Marker an dieser Position fest zu montieren. Der neue Marker kann anschließend in die Kombination übernommen werden.

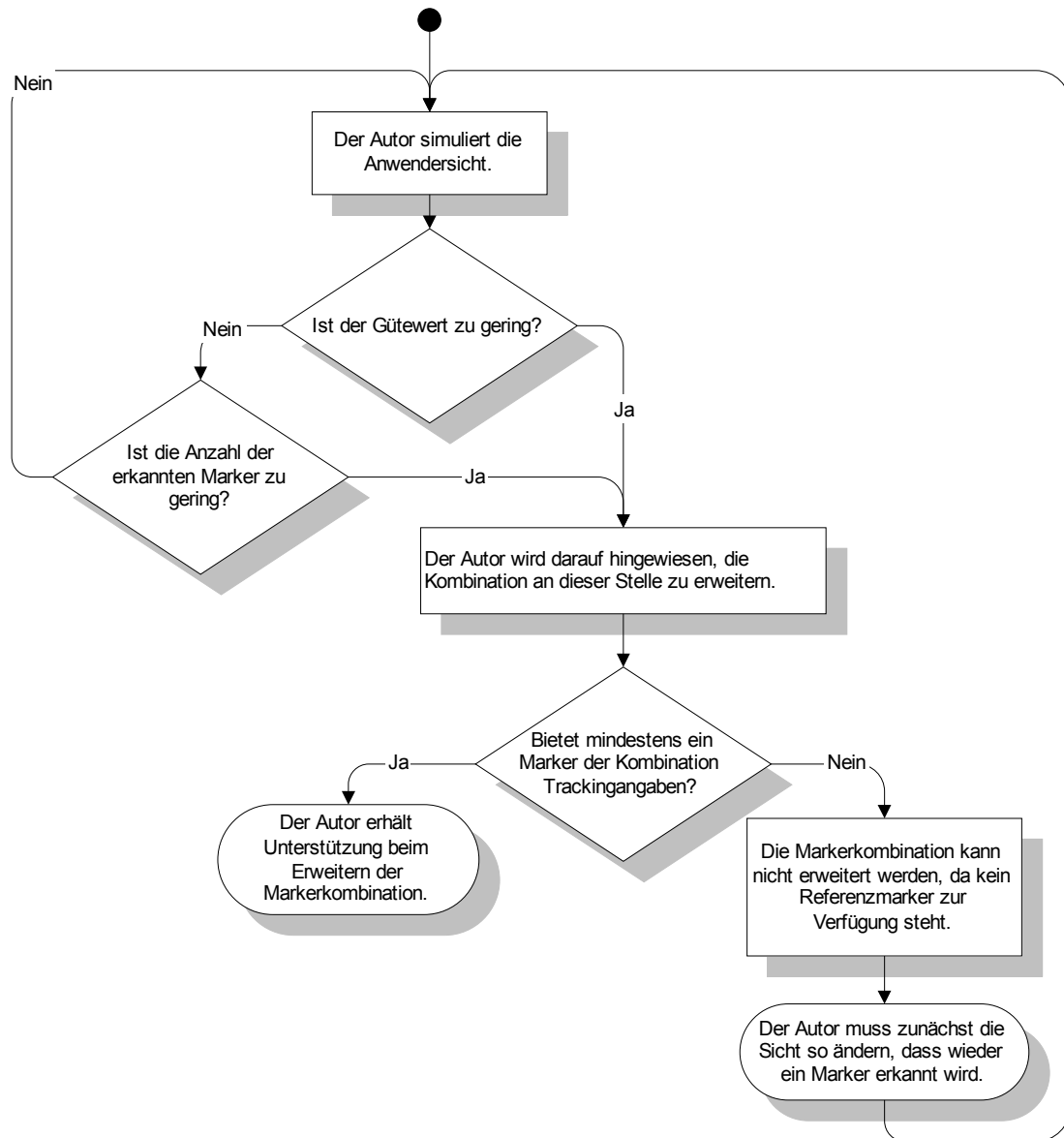


Abbildung 4.7: Ablaufschema der Orbitingunterstützung

Rückblickend betrachtet werden die Anwendungsmöglichkeiten vom markerbasiertem Tracking durch das Konzept der redundanten Markerkombinationen auch auf problematische Anwendungsfälle erweitert, die beispielsweise durch Verdeckung von Markern eingeschränkt werden. Durch die automatisierte Markerauswahl und der interaktiven Anpassungsmöglichkeit der Kombination kann ein Autor die Markerkombination auf die zu erstellende MR-Anwendung speziell anpassen und erhält dabei auch Unterstützung im problematischen Anwendungsfall des Orbiting.

4.4 Markertupel als Trackinginformation

Bei markerbasierten Trackingsystemen müssen die einzelnen Marker vom System eindeutig identifiziert werden, um deren Trackingangaben richtig zuordnen zu können. Das ARToolKit [KBP00a] Trackingsystem verwendet beispielsweise zur Identifizierung variable Muster innerhalb des quadratischen Marker, die vom Autor der MR-Anwendung ausgewählt oder selbst erstellt werden können. Wie schon in der Analyse im [Abschnitt 3.5](#) „Vorüberlegung zur Wiederverwendung von Markern“ festgestellt wurde, wird es mit zunehmender Anzahl von Markern immer schwieriger eindeutig unterscheidbare Muster zu erstellen, die dann auch unter widrigen Umständen von System richtig zugeordnet werden können.

Owen et al. [OXM02] weisen darauf hin, dass je genauer dabei die Identifizierung der Muster sein soll, um eventuell auch ähnliche Muster zulassen zu können, desto umfangreicher wird auch die Überprüfung, die das System dabei durchführen muss. Die Performance des Systems erzwingt eine Beschränkung der Anzahl von markerbasierten Trackingquellen. Die Beschränkung der Trackingquellen verhindert allerdings den Einsatz von markerbasierten Trackingsystemen in großen Anwendungsszenarien, bei denen auch eine Vielzahl von Markern zum Einsatz kommen muss.

Hierfür muss eine Technik angeboten werden, die die Wiederverwendung der einzelnen Trackingquellen ermöglicht. Zur Wiederverwendung von Markern kann der Ansatz der Bereichsunterteilung gewählt werden, der auch schon im [Abschnitt 3.5](#) betrachtet wurde. In großen Anwendungsszenarien kann die reale Umgebung in getrennte Bereiche aufgeteilt werden (z.B. die Zimmer eines Flures, oder die Stockwerke eines Gebäudes). Diese Bereiche sind voneinander strikt getrennt, so dass sie auch nicht voneinander einsehbar sind.

Die Marker eines Bereiches können dann in einem anderen Bereich wieder verwendet werden. Dabei muss allerdings geklärt sein in welchem Bereich man sich befindet, um die Trackinginformationen richtig zuordnen zu können. Um eine solche Bereichsaufteilung der Marker zu ermöglichen, dienen die Marker nicht mehr allein als Trackinginformation, sondern werden in einer Kombination verwendet. Durch die Kombination mehrerer Marker stehen am Ende mehr unterscheidbare Trackinginformationen zur Verfügung. Das System muss dabei alle Marker und deren Kombinationen verwalten und die entsprechenden Trackinginformationen zur Verfügung stellen.

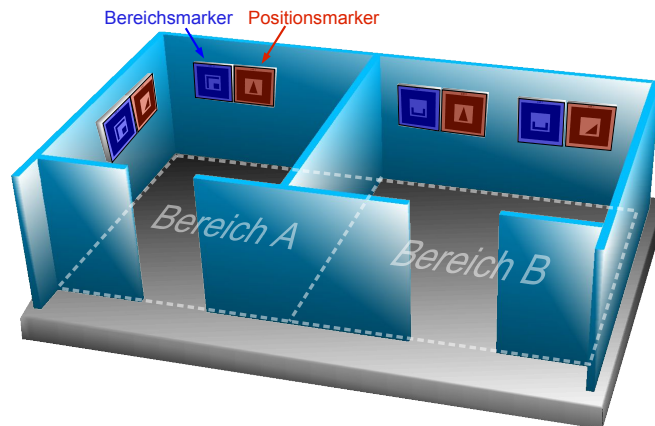


Abbildung 4.8: Positions- und Bereichsmarker

Eine Kombination besteht dabei aus einem Bereichsmarker, der den aktuellen Bereich festlegt, und einem Positionsmarker, der die eigentliche Trackinginformation liefert. Die Positionsmarker eines Bereiches können dann in anderen Bereichen wieder verwendet werden. [Abbildung 4.8](#) zeigt das Prinzip dieser Kombination von Markern. Bei 10 Bereichen mit jeweils 10 Positionsmarkern können dadurch insgesamt 100 unterscheidbare Trackinginformationen erzeugt werden, wobei nur 20 unterschiedliche Marker benötigt werden.

Das Prinzip, das die Wiederverwendung von Markern ermöglicht, ist somit gefunden. Es stellt sich nun die Frage, wie es dem Autor einer MR-Anwendung ermöglicht wird, diese Wiederverwendung nutzen zu können. Dazu sollte dem Autor die Arbeit abgenommen werden, feststellen zu müssen in welchem Bereich sich der Anwender befindet und wie dementsprechend die Trackinginformationen der Positionsmarker zugeordnet werden müssen. Diese automatisierte Zuordnung wird in dem folgenden [Unterabschnitt 4.4.1](#) betrachtet.

Außerdem sollte der Autor bei der Erstellung die Möglichkeit besitzen, die Bereiche und die darin enthaltenen Positionsmarker den Umständen anpassen zu können. Werden beispielsweise in einem Bereich noch weitere Marker benötigt, soll der Autor diese anfordern können, worauf genauer im [Unterabschnitt 4.4.2](#) eingegangen wird.

4.4.1 Verwaltung der Markertupel

Das im vorhergehenden Abschnitt vorgestellte Prinzip der Bereichsunterteilung ermöglicht eine Wiederverwendung von Markern in mehreren Bereichen. Das Tracking erfolgt dann anhand einer Kombination von Markern, die zum einen aus einem Bereichsmarker und zum anderen aus einem Positionsmarker besteht. Dabei definiert der Bereichsmarker den Bereich in dem sich die Kombination der Marker befindet. Der Positionsmarker wird dann für die Bestimmung der eigentlichen Trackinginformation verwendet.

Um dieses Prinzip der Wiederverwendung dem Autor einer MR-Anwendung nutzbar zu machen, sollten die zur Verfügung stehenden Marker und deren Kombinationen im Hintergrund verwaltet werden.

Das System entscheidet anhand der erkannten Bereichsmarker im welchem Bereich der Anwender sich befindet und ordnet die Trackinginformationen der Positionsmarker, den Markern des entsprechenden Bereiches zu. Um dem Autor die Verwendung dieser Trackinginformationen zu erleichtern, sollten für jeden Positionsmarker in allen Bereichen eine Schnittstelle zu dessen Trackinginformationen angeboten werden. Somit sind die Trackingangaben der Positionsmarker, die in mehreren Bereichen wieder verwendet werden, unterscheidbar und für den Autor an der entsprechenden Schnittstelle abrufbar. Diese Schnittstelle sollte sich nicht wesentlich von der Schnittstelle unterscheiden, die es dem Autor ermöglicht die Trackinginformation von einzelnen Markern abzurufen.

Wenn der Autor im Erstellungsprozess die Anwendersicht einnimmt und simuliert, sollte er Informationen über die im Hintergrund ablaufenden Funktionen bekommen. Eine Visualisierung welcher Bereich aktiv ist und welche Positionsmarker des Bereiches Trackinginformationen liefern ist dabei hilfreich. Außerdem sollte der Autor dabei auch auf Konfliktsituationen hingewiesen werden, die darauf beruhen, dass zu einem Zeitpunkt mehrere Bereichsmarker vom System erkannt werden. Dadurch kann das System die Trackinginformationen der einzelnen Positionsmarker nicht eindeutig zuordnen, da nicht klar ist, in welchem Bereich sich der Anwender (in dem Fall der Autor selbst) befindet.

4.4.2 Interaktives Anfordern von Markertupeln

Da das System die Markerkombinationen automatisch erkennt und die entsprechenden Trackinginformationen bereitstellt, muss es dem Autor ermöglicht werden neue Markerkombinationen vom System anfordern zu können. Der Autor sollte für die schon vorhandenen Bereiche weitere Positionsmarker anfordern können und er sollte auch das System um weitere Bereiche erweitern können.

Beim Anfordern neuer Positionsmarker für einen Bereich, oder beim Anfordern neuer Bereichsmarker muss die Integrität des Systems gewährleistet sein. Für die Bereichs- und Positionsmarker gelten dabei folgende Integritätsregeln:

- In einem Bereich können verschiedenen Positionsmarker verwendet werden.
- Ein Positionsmarker kann in einem Bereich nur einmal verwendet werden.
- Derselbe Positionsmarker kann in verschiedenen Bereichen verwendet werden.
- Bereichsmarker können nicht als Positionsmarker verwendet werden und umgekehrt.

Das System nimmt dem Autor die Überprüfung dieser Regeln ab und bietet dem Autor einen Marker an, der diese Regeln erfüllt.

Beim Anfordern von neuen Markerkombinationen soll dem Autor auch verdeutlicht werden, welche Bereiche bereits erstellt wurden und welche Positionsmarker in den Bereichen schon zur Verfügung stehen. Somit behält der Autor den Überblick über die erzeugten Markerkombinationen.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass der Ansatz der Bereichsunterteilung die Wiederverwendung von Markern ermöglicht und mit Hilfe der Markertupel die Bereicherkennung realisiert werden kann. Das vorgestellte System, dass die Verwaltung dieser Markertupel im Hintergrund ablaufen lässt, ermöglicht dem Autor die Nutzung dieses Ansatzes, wobei die Trackingangaben der einzelnen Markertupel für den Autor an den Schnittstellen des Systems abgerufen werden können. Ebenfalls werden die Anpassung der Bereiche und die Erweiterung durch das System unterstützt, so dass der Autor die Bereichsunterteilung und die darin beinhalteten Marker der Anwendung entsprechend anpassen kann.

4.5 Zusammenfassung

Die Wahl des markerbasierten Tracking, die auf Grund der einfachen, flexiblen und dabei auch kostengünstigen Einsatzmöglichkeiten getroffen wurde, hat auch zur Folge, dass die damit verbundenen Beschränkungen, die das markerbasierten Tracking mit sich bringt, behandelt werden müssen. Die Konzepte die in diesem Kapitel entwickelt wurden konzentrieren sich auf die problematischen Anwendungsbereiche die spezielle durch Verdeckung von Markern, durch Schwankungen in den Trackingangaben und durch die Beschränkung der Anzahl von verwendbaren Markern zustande kommen.

Das Konzept der Markerkategorien ermöglicht den einfachen Einsatz von angepassten Filterungstechniken beim Tracking von Markern. Dazu werden Marker zu einer Kategorie zusammengefasst, wenn deren zur Filterung entscheidenden Eigenschaften ähnlich sind. Dem Autor wird dabei die Wahl der Filtertechnik abgenommen und auch die Anwendung der Filterung. Die Aufgabe des Autors besteht dann lediglich darin, die Marker in die Kategorien einzuordnen, wobei auch dabei eine Hilfestellung angeboten wird.

Das Konzept der redundanten Markerkombinationen ermöglicht den Einsatz von markerbasiertem Tracking auch in Bereichen, in denen die Verdeckung von Markern ein Problem bereitet. Durch das Vereinen der Trackingangaben mehrere Marker, in einer Markerkombination, können auch die Schwankungen der einzelnen Trackingangaben verringert werden. Das Konzept der Gütefunktion bietet dazu eine Möglichkeit die Trackingangaben qualitativ vergleichen zu können. Durch diese Vergleichsmöglichkeit wird eine automatisierte Auswahl von Markern in einer Kombination realisierbar, bei der die Qualität der Trackingangabe als Maß dient. Dem Autor kann somit eine automatisierte Kombination von Trackingangaben geboten werden, die mit Hilfe von interaktiven Methoden eine Erweiterung und Anpassung der Kombination zulässt. Die Aufgabe des Autors ist somit darauf beschränkt, die Marker zu bestimmen, die zu einer Kombination zusammengefasst werden sollen.

Das Konzept der Markertupel führte zu einer Wiederverwendung von Markern. Das Prinzip der Bereichsunterteilung ermöglicht dabei, gleiche Marker in mehreren Bereichen zu verwenden. Ein System verwaltet dazu sämtliche Markertupel und bietet dem Autor für jeden Marker eine separate Schnittstelle, die Zugriff auf dessen Trackingangaben ermöglicht. Die Verwaltung der Bereiche und deren Marker werden dem Autor dabei abgenommen, wobei eine dynamische Anpassung und Erweiterung ermöglicht wird. Der Autor fordert somit lediglich noch neue Bereiche vom System an, oder fordert neue Marker in einem Bereich an und erhält entsprechend eine Markertupel, das wie eine einfache Trackingquelle vom Autor angewendet werden kann.

Im [Kapitel 5](#) der Realisierung, wird anschließend gezeigt, wie die entwickelten Konzepte umgesetzt werden können. Im darauf folgenden [Kapitel 6](#) der Implementierung, wird die spezielle Umsetzung der Konzepte in der AMIRE-Autorenumgebung gezeigt, wobei die Überführung in AMIRE-Komponenten und das Zusammenspiel dieser Komponenten im Vordergrund steht.

Kapitel 5

Realisierung

Die markerbasierte Trackingtechnologie hat sich als eine legitime Wahl für das Tracking in MR-Anwendungen herausgestellt. Problembereiche des markerbasierten Tracking wurden erkannt und Konzepte entwickelt die auf Lösungsansätze im Bereich der Kombination und Wiederverwendung von Markern, und im Bereich der Filterung von Trackingangaben angesiedelt sind. Dabei wurde speziell die Unterstützung des Autors im Entwicklungsprozess der MR-Anwendung berücksichtigt.

Das Kapitel der Realisierung beschreibt nun eine Umsetzung der vorgestellten Konzepte aus dem vorhergehenden Kapitel. Dabei wird gezeigt, wie die einzelnen Konzepte, der Kategorisierung von Markern, der redundanten Markerkombination und der Wiederverwendung von Markern, durch Markertupel, und die entsprechenden Autorenwerkzeuge aussehen können.

5.1 Markerkategorien

Im [Abschnitt 4.1](#) der Konzeption, wurde aufgrund der vielfältigen Filterungsmöglichkeiten das Konzept der Markerkategorien entwickelt und beschrieben, bei dem die Marker anhand ihrer zur Filterung entscheidenden Eigenschaften zusammengefasst werden. Die Anwendung angepasster Filtertechniken, auf die jeweiligen Positions- und Orientierungsangaben des Markertracking einer Kategorie, ermöglicht das Herausfiltern von Fehlmessungen, das Ausgleichen von Schwankung in der Positions- und Orientierungsangabe und das Extrapolieren von Werten beim Abbrechen der Erkennung.

Als Kriterien der Kategorisierung wurden die Eigenschaften der Marker in Bezug auf deren Dynamik und des Erkennungsverhalten ausgewählt, die sicherlich keine vollständige Beschreibung des Verhaltens von Trackingquellen ermöglicht. Allerdings kann anhand dieser Kriterien das allgemeine Prinzip dargestellt werden und eine Realisierung präsentiert werden, die durchaus an anderer Stelle mit den gegebenen Umständen wachsen und angepasst werden kann. Die gewählten Kriterien und die Filterungstechniken sind dabei austauschbar.

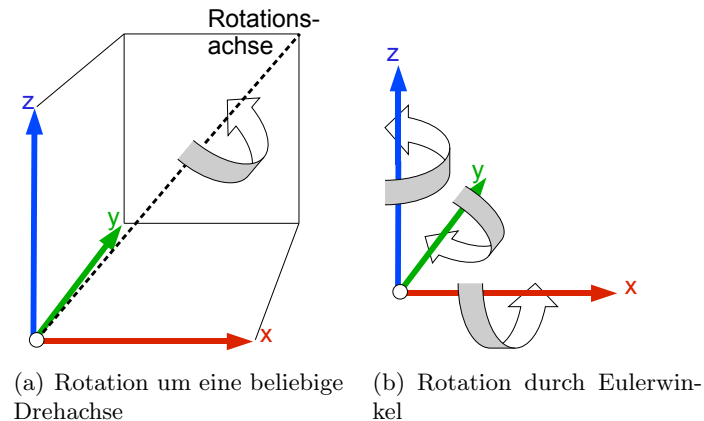


Abbildung 5.1: Verschiedene Rotationspräsentationen

5.1.1 Filterung von Positions- und Orientierungsangaben

Zunächst ist festzustellen, dass die Trackingangaben in unterschiedlicher Form zur Verfügung stehen können. Beim Tracking mit Hilfe des ARToolKit-Systems werden beispielsweise die Positionierungs- und Orientierungsangabe eines Markers in Form einer affinen Transformation dargestellt, die durch eine 4×4 Matrix repräsentiert wird. Diese affine Transformation kombiniert eine Translation mit einer Rotation, die zusammen die Positionierung und Orientierung des Markers im Kamerakoordinatensystem darstellen. Solche Orientierungs- und Positionierungsangaben können auch in anderer Form dargeboten werden. Beispielsweise kann die Rotation um eine beliebigen Rotationsachse durch eine Winkelangabe festgelegt werden [ESK96] (wie in [Abbildung 5.1](#) angedeutet). Genauso kann die Rotation durch die so genannten Eulerwinkel [Sho85] spezifiziert werden, bei der die Rotation in Form von drei Winkelangaben festgelegt wird, wobei sich die Winkelangaben auf eine festgelegte Abfolge der Rotation um die Koordinatenachsen beziehen.

Solche Rotationsangaben sind allerdings laut Shoemake [Sho85] äquivalent und können ineinander überführt werden. Eine herausragende Position nimmt dabei die Rotation mit Hilfe von Quaternionen ein. Die Art der Repräsentation von Rotationen ermöglicht eine einfache Interpolation von Rotationsangaben, oder auch eine Mittelwertbestimmung von Rotationsangaben, wie sie in der redundanten Markerkombination benötigt werden. Dazu können die vierdimensionalen Vektorrepräsentanten der Quaternionen interpoliert werden [Mor92, MH99].

Dies gilt ebenfalls für die Positionsangaben, bei denen auch unterschiedliche Präsentationen gewählt werden können. Für die Filterung der Positions- und Orientierungsangaben sollen die Vektorenangabe in der x-, y- und z-Koordinate verwendet und die Vektorenrepräsentation der Quaternionen genutzt werden. Es stellt sich nun die Frage, wie die Filterung dieser Werte realisiert wird und wie die Filterung den Kategorien angepasst wird. Dazu werden die einzelnen Kategorien (die in [Tabelle 4.1](#) aufgeführt

sind) betrachtet und die Techniken die dabei zum Einsatz kommen erläutert. Prinzipiell kommt zur Filterung der Angaben der lineare diskrete Kalman-Filter zum Einsatz, wie er von Welch und Bishop [WB97] beschrieben wird.

Immer sichtbarer, unbeweglicher Marker: Ein Beispiel dafür wäre ein Marker der fest an einer Wand montiert ist und mit einer, auf einem Stativ stehenden Kamera betrachtet wird. Die Positions- und Orientierungsangaben können dabei restriktiv gefiltert werden, da Positions- und Orientierungsänderungen nicht entstehen. Die Angaben bleiben konstant, bis auf die Schwankungen denen sie unterliegen. Für diese Art der Filterung der Trackingangaben wird die Initialisierung des Kalman-Filters mit restriktiveren Einstellungen vorgenommen.

Da die Marker dieser Kategorie immer innerhalb des Sichtfeldes der Kamera verbleiben, können deren Positions- und Orientierungsangaben auch bei einer Verdeckung extrapoliert werden. Dazu wird die Funktionalität der Kalman-Filterung genutzt, die auch bei ausbleibenden Messangaben Vorhersagewerte erzeugen kann.

Immer sichtbarer, gering beweglicher Marker: Langsame Pendelbewegungen, die innerhalb des Sichtfeldes der Kamera stattfinden, wäre ein Beispiel für diese Art von Bewegung. Dabei ändert sich die Geschwindigkeit des Objektes innerhalb eines geringen Zeitintervalls nur unmerklich.

Die Trackingangaben eines Markers dieser Kategorie können ebenfalls extrapoliert werden, wenn zusätzlich zur Positionierung und Orientierung, die Geschwindigkeit des Markers erfasst wird. Es bietet sich dazu eine Filterung dieser Angaben an, mit deren Hilfe beim Abbrechen der Trackinginformation, beispielsweise durch Verdeckung des Markers, die Trackingangaben extrapoliert werden, speziell durch den Einsatz der Geschwindigkeit. Die Initialisierung des Kalman-Filters darf dabei nicht mit den restriktiven Einstellungen der vorigen Kategorie vorgenommen werden, da der Marker keine starre Position und Orientierung besitzt.

Immer sichtbarer, stark beweglicher Marker: Bei beschleunigten Bewegungen innerhalb des Sichtfeldes der Kamera kann dieses Verhalten vorkommen. Ein Marker der eine solche Bewegung ausführt, kann nur dann extrapoliert werden, wenn die Beschleunigung der Bewegung berücksichtigt wird. Die Filterung von Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung ermöglicht eine Vorhersage der Trackingangabe, auch wenn die Markerbewegung einer Geschwindigkeitsänderung unterliegt.

Teilweise sichtbarer, unbeweglicher Marker: Diese Kombination der Eigenschaften ist, wie auch schon in der Analyse festgestellt wurde, nicht möglich, da ein unbewegter Marker entweder immer sichtbar ist oder immer außerhalb des Sichtfeldes der Kamera liegt.

Teilweise sichtbarer, gering beweglicher Marker: Ein Beispiel für diese Kategorie, wäre das Tracking eines Spaziergängers aus größerer Entfernung, wobei der Spazier-

gänger sich auch außerhalb des Sichtfeldes einer Überwachungskamera bewegen kann. Die Filterung der Trackingangaben eines Markers dieser Kategorie ist dabei identisch zur Filterung der „immer sichtbaren, gering beweglichen Marker“, da die Eigenschaft der Dynamik in beiden Kategorien gleich ist. Allerdings kann eine Extrapolierung nicht durchgeführt werden, da der Marker auch komplett das Sichtfeld der Kamera verlassen kann.

Teilweise sichtbarer, stark beweglicher Marker: Das Tracking von Handbewegungen ist ein Beispiel für diese Kategorie. Dabei wird keine Extrapolierung der Angaben durchgeführt, da der Marker aus dem Sichtfeld verschwinden kann, und es wird dabei auch keine Filterung durchgeführt.

Der Autor einer MR-Anwendung richtet bei der Verwendung eines Markers dann sein Augenmerk auf die Zuordnung einer Kategorie, und nicht auf die Filterung der Positionierungs- und Orientierungsangaben die beim Tracking des Markers erzeugt werden. Die Filterung findet nach der Kategorisierung eines Marker automatisiert im Hintergrund statt, wobei der Autor die Trackinginformation in gewohnter Form abrufen kann, wie es im [Abschnitt 4.1](#) beschrieben und in [Abbildung 4.1](#) dargestellt wird.

5.1.2 Hilfestellung bei der Kategorisierung von Markern

In dem vorangehenden Abschnitt ist die Handhabung der einzelnen Markerkategorien beschrieben, wobei speziell auf die Filterung und Extrapolierung der Trackingangaben eingegangen wird. In diesem Abschnitt steht nun die Hilfestellung im Mittelpunkt, die der Autor bei der Kategorisierung bekommt.

Wie schon in der Konzeption festgestellt wird, ist die Bestimmung einer passenden Kategorie für einen Marker für den Autor eventuell nicht eindeutig, da die Kriterien der Kategorien dem Autor beispielsweise nicht bekannt sind, oder auch die Eigenschaften des Markers, die für eine Zuordnung benötigt werden.

Für diesen Fall wird ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, das den Autor bei der Bestimmung der Eigenschaften eines Markers unterstützt und die Zuordnung der Kategorien ermöglicht. Das Werkzeug besitzt dazu eine graphische Benutzungsschnittstelle, um mit dem Autor in Kontakt zu treten. Darüber können Aktionen vom Autor eingeleitet werden. Genauso erhält der Autor über diese Schnittstelle, Informationen über den Stand der Kategorisierung. Auf die Funktionsweise dieses Werkzeuges wird im Folgenden eingegangen.

Das Kategorisierungswerkzeug arbeitet in drei aufeinander aufbauenden Phasen, durch die der Autor bei der Kategorisierung geführt wird. Hierzu wird der schematische Ablauf dieser Phasen in [Abbildung 5.2](#) dargestellt. Dem Autor wird dazu auch die Möglichkeit eingeräumt, die einzelnen Phasen erneut zu durchlaufen, um die darin getroffenen Entscheidungen anpassen zu können.

In der ersten Phase wird der Autor angewiesen den zu kategorisierenden Marker auszuwählen. Dabei trifft das Kategorisierungswerkzeug Vorbereitungen, um anschließend

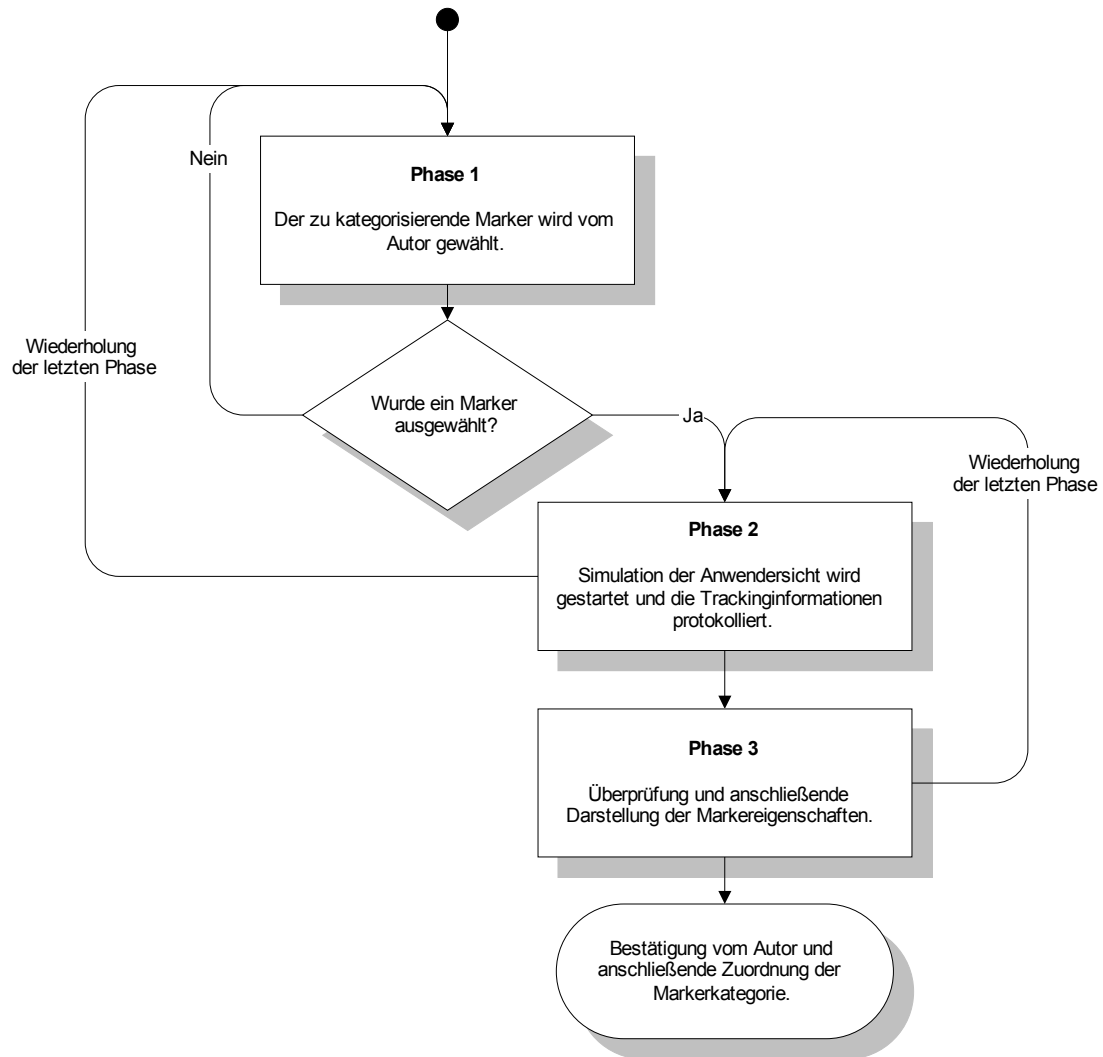


Abbildung 5.2: Schematischer Ablauf der Kategorisierung

die Trackinginformation des gewählten Markers bestimmen zu können. Der Autor bekommt nach der Auswahl des Markers auch die Möglichkeit diese zu verändern, wobei ihm der momentan ausgewählte Marker angezeigt wird. Wurde die Auswahl vom Autor getroffen, wird er aufgefordert in die nächste Phase zu wechseln. In der Darstellung der GUI von [Abbildung 5.3\(a\)](#) wird der Wechsel in die nächste Phase durch die Aktivierung des „Next“ Buttons erst ermöglicht, wenn die in [Abbildung 5.3\(b\)](#) dargestellte Wahl des Markers durchgeführt wurde.

In der zweiten Phase wird der Autor angewiesen die Anwendersicht einzunehmen und damit das Verhalten des Markers während der Anwendung zu simulieren. Das Werkzeug protokolliert dabei die Trackingangaben des Markers über den Zeitraum der Simulation. In der Darstellung von [Abbildung 5.3\(c\)](#) aktiviert der Autor die Simulation durch das Drücken eines Buttons, worauf er anschließend eine Anzeige über den zeitlichen Verlauf der Simulation erhält. Durch diese Verlaufsanzeige wird er auch darauf hingewiesen, wenn die Simulation beendet ist. Das Kategorisierungswerkzeug kann nach der Simulation wiederum durch das Drücken des „Next“ Buttons in die nächste Phase wechseln.

In der dritten und letzten Phase werden zunächst die protokollierten Trackingangaben auf die Kategorisierungskriterien überprüft. Die Zuordnung in die Eigenschaften „unbewegt“, „gering bewegt“ und „stark bewegt“ wird anhand der folgenden Berechnungen durchgeführt.

Unbewegter Marker: Da die einzelnen Trackingangaben gewissen Schwankungen unterliegen wird zunächst der Mittelwert über die Trackingangaben des Simulationszeitraums bestimmt, um anschließend die einzelnen Angaben daraufhin zu überprüfen, ob sie zu stark vom berechneten Mittelwert abweichen. Ist die Abweichung unterhalb eines festgelegten Grenzwertes (der mit Hilfe von empirischen Werten festgelegt wurde) kann davon ausgegangen werden, dass der Marker keine Bewegung vollzogen hat und bekommt die Eigenschaft „unbewegt“ zugeordnet. Anderenfalls wird dem Marker eine Bewegung zugesprochen und wird daraufhin auf die weiteren Eigenschaften „gering bewegt“ und „stark bewegt“ untersucht.

Gering bewegter Marker: Um die Eigenschaft der geringen Bewegung nachzuweisen, werden die aufeinander folgenden Trackingangaben auf Positions- und Orientierungsänderungen untersucht. Bleiben diese Angaben unter einem empirisch festgelegten Wert, wird diesem Marker die Eigenschaft „gering bewegt“ zugeordnet.

Stark bewegter Marker: Fand bei den beiden vorangegangenen Überprüfungen keine Zuordnung statt, wird dem Marker die stärkste dynamische Eigenschaft zugesprochen.

Neben den Eigenschaften der Dynamik werden die Eigenschaften des Erkennungsverhaltens über den Zeitraum der Simulation überprüft. Dazu wird festgestellt, ob die Trackingangaben während der Simulation zu jedem Zeitpunkt berechnet werden konnten. Werden keine Unterbrechungen festgestellt, wird dem Marker die Eigenschaft „immer

sichtbar“ zugeordnet. Wird eine Unterbrechung des Trackings während der Simulation festgestellt, könnte diese Unterbrechung auch aufgrund von Verdeckungen oder wechselnden Lichtverhältnissen zustande gekommen sein, die bei der Kategorisierung nicht berücksichtigt werden sollen. Die Eigenschaft „zeitweise sichtbar“ gibt schließlich an, dass der Marker sich nicht andauernd im Sichtfeld der Kamera befindet. Aus diesem Grund wird in dem Fall, der unterbrochenen Erkennung des Markers, der Autor befragt, ob der Marker sich trotz Trackingunterbrechung im Sichtfeld der Kamera aufgehalten hat.

Das Ergebnis der Kategorisierung des Markers steht somit fest und wird dem Autor anhand der festgestellten Eigenschaften präsentiert, wie es in [Abbildung 5.3\(d\)](#) dargestellt wird. Dem Autor stehen jetzt noch die Möglichkeiten offen die Eigenschaften selbstständig anzupassen, bevor er dem Marker die entsprechende Kategorie durch einen Mausklick zuweist. Die Kategorisierung des Markers ist somit vollzogen.

5.2 Gütefunktion

Im [Abschnitt 4.2](#) der Konzeption wurde auf die Schwankungen in den Positionierungs- und Orientierungsangaben beim Tracking hingewiesen, die zum einen zum Konzept der Markerkategorien und zum anderen zum Konzept der Gütefunktion für Trackingangaben führte. Dabei wurde festgestellt, dass die Genauigkeit von Positionsangaben beim markerbasiertem Tracking abhängig vom Abstand, sowie der Orientierung des Markers zur Kamera ist. Die Gütefunktion soll als Maß für die Qualität der erzeugten Orientierungs- und Positionierungsangaben einer Trackingquelle dienen und dabei diese Abhängigkeiten berücksichtigen.

Um eine Gütefunktion, mit diesen Eigenschaften realisieren zu können, werden zunächst die Abhängigkeiten mit Hilfe von Messungen festgestellt. Diese Messungen sollen zum einen die Diskrepanz zwischen den Trackingangaben und den realen Positionierungs- und Orientierungsangaben bestimmen, und zum anderen die Schwankungen in den Trackingangaben identifizieren.¹

5.2.1 Messungen zur Gütefunktion

Die Ungenauigkeit der Angaben beim markerbasierten Tracking, sind nach Malbezin et al. [[MPT02](#)] abhängig vom Abstand des Markers zur Kamera und abhängig von der Orientierung des Markers zur Kamera. Aufgrund dieser Feststellung werden Messungen in Positions- und Orientierungsangaben des Markers durchgeführt, bei denen der Abstand vom Marker zur Kamera (Kameraabstand) gemessen wird und der Winkel den der Marker zur Kamera (Kamerawinkel) einnimmt. Wie diese Werte bestimmt werden ist in [Abbildung 5.4\(b\)](#) dargestellt.

¹Das Konzept der Gütefunktion und deren Realisierung durch die Durchführung und Auswertung dieser Messungen, wurden veröffentlicht und werden auf der ISMAR'04 vorgestellt [[ABD04](#)].



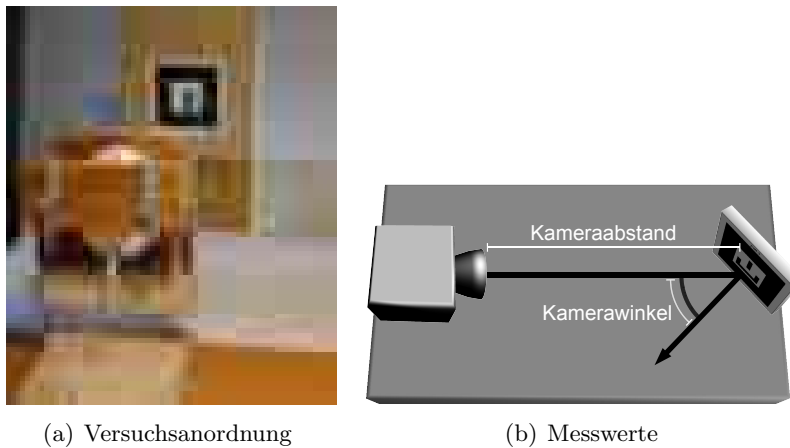


Abbildung 5.4: Messanordnung und Messwerte

Messaufbau

Für die Durchführung der Messung wird ein $55 \pm 0,2$ mm breiter Marker auf einer drehbaren Halterung befestigt (siehe [Abbildung 5.4\(a\)](#)). Mit dieser Halterung lässt sich der Winkel zur Kamera von 0° , $2,5^\circ$, 5° , ..., 85° , $87,5^\circ$, 90° ($\pm 0,25^\circ$) einstellen. Die verwendete Philips PCVC750K Kamera ist auf einer stabilen Halterung montiert, die im Abstand von 20 cm, 30 cm, ..., 90 cm, 100 cm ($\pm 0,2$ cm) zum Marker positioniert werden kann. Kamera und Marker sind dabei auf $12,5 \pm 0,1$ cm Höhe befestigt.

Bei den Messungen wird die Kamera zunächst zum gewünschten Abstand positioniert und anschließend so justiert, dass der Videobildmittelpunkt mit dem Markermittelpunkt übereinstimmt. Wenn Blickrichtung der Kamera und Markernormale parallel sind, wird bei gleicher Höhe des Markermittelpunktes und der Kamera ein möglichst genauer Kamerawinkel von 0° erreicht. Die Messung der Trackingangaben wird für jedes Videoframe protokolliert, wobei für jeden Kameraabstand und Kamerawinkel 250 solcher Angaben aufgezeichnet werden. Sind die 250 Messwerte aufgenommen, wird der Kamerawinkel durch das Drehen der Markerhalterung, bei gleich bleibendem Kameraabstand erhöht und die Messung erneut gestartet. Sind alle Winkel eines Abstandes abgearbeitet, wird eine neue Messreihe beim nächst größeren Kameraabstand durchgeführt.

Durchführung der Messreihen

Um die Qualität der Markererkennung zu bestimmen, werden die Abweichung des Mittelwertes der jeweils 250 Messwerte vom realen Wert (also dem systematischen Fehler) und die Standardabweichung der jeweils 250 Messwerte berechnet. Die Standardabweichung ist dabei ein Maß für die Schwankungsstärke der Messwerte und somit auch ein Maß für die Qualität der Messung. Es werden somit die folgenden Eigenschaften betrachtet und anhand der Messwerte berechnet.

Schwankung des Kamerawinkels: Hierzu wird die Standardabweichung des Kamerawinkels über die jeweils 250 Messwerte an den verschiedenen Positionen berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in [Abbildung 5.5](#) zusammengefasst, wobei die Standardabweichung in Abhängigkeit vom Kamerawinkel aufgetragen ist. Eine Kurve entspricht in dieser Darstellung dem Verlauf der Standardabweichung zu einem festen Kameraabstand.

Schwankung des Kameraabstandes: Hierzu wird die Standardabweichung des Kameraabstandes über die jeweils 250 Messwerte zu den verschiedenen Positionen bestimmt. Die Ergebnisse sind wiederum in [Abbildung 5.6](#) zusammengefasst, wobei die Standardabweichung in Abhängigkeit vom Kameraabstand aufgetragen ist. Eine Kurve entspricht in dieser Darstellung dem Verlauf der Standardabweichung zu einem festen Kamerawinkel.

Systematischer Fehler des Kamerawinkels: Der Mittelwert über die jeweils 250 Messwerte wird hierzu berechnet, um zunächst die Schwankungen zu eliminieren. Anschließend wird dieser Mittelwert mit den realen Winkelangaben verglichen. Die Differenz zwischen diesen Werten gibt den systematischen Fehler in der Winkelangabe wieder. Die Ergebnisse dieser Berechnung ist in [Abbildung 5.7](#) zusammengefasst, wobei der systematische Fehler des Kamerawinkels in Abhängigkeit vom Kamerawinkel aufgetragen ist. Jede dieser Kurven entspricht einer Messreihe bei gleich bleibendem Kameraabstand. Sie beschreiben dabei den Verlauf des Fehlers über die verschiedenen einnehmbaren Kamerawinkel.

Systematischer Fehler des Kameraabstandes: Auch hierzu wird zunächst der Mittelwert des Kameraabstandes über die jeweils 250 Messwerte gebildet. Die Differenz zum realen Abstand gibt dann den systematischen Fehler des Kameraabstandes an. Auch diese Ergebnisse sind in [Abbildung 5.8](#) zusammengefasst, wobei der systematische Fehler des Kameraabstandes in Abhängigkeit vom Kameraabstand aufgetragen ist. Jede dieser Kurven entspricht einer Messreihe bei gleich bleibendem Kamerawinkel und beschreibt dabei den Verlauf des Fehlers über die verschiedenen einnehmbaren Kameraabstände.

Auswertung der Messergebnisse

Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen werden an dieser Stelle zusammenfassend betrachtet. Dabei werden die einzelnen Messergebnisse nach Abhängigkeiten zwischen Stärke der Schwankungen und Kameraabstand bzw. -winkel untersucht, genauso wie nach Abhängigkeiten zwischen dem systematischen Fehler und dem Abstand bzw. Winkel.

Im Diagramm der Standardabweichung der Winkelmessung (siehe [Abbildung 5.5](#)) wurde für jeden Kameraabstand eine Kurve eingetragen, die den Verlauf der Standardabweichung über die verschiedenen Kamerawinkel zeigt. Das Diagramm stellt die

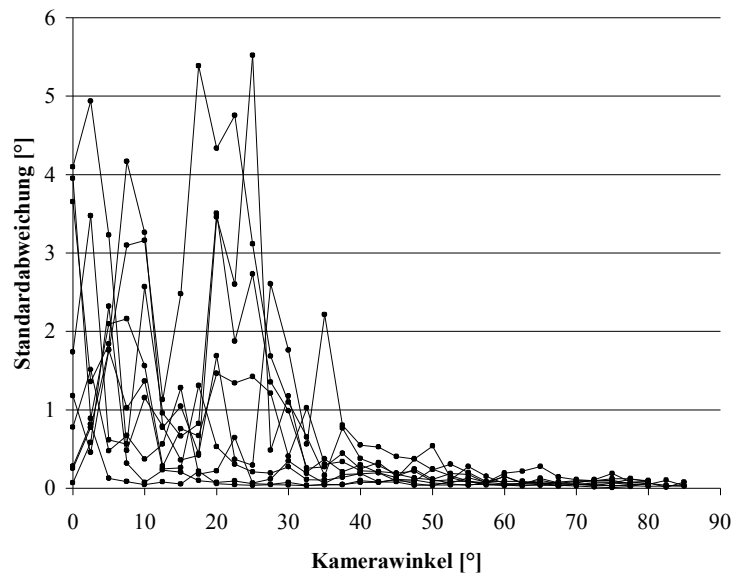


Abbildung 5.5: Standardabweichung der Winkelmessung

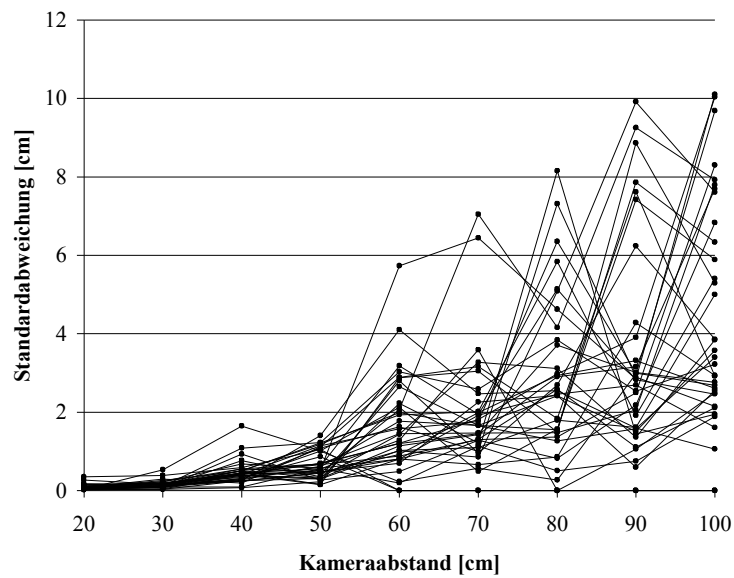


Abbildung 5.6: Standardabweichung der Abstandsmessung

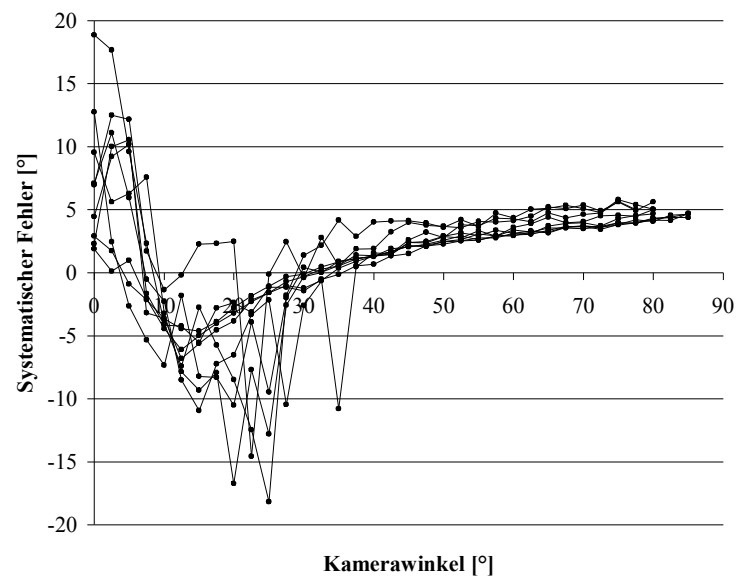


Abbildung 5.7: Systematischer Fehler der Winkelmessung

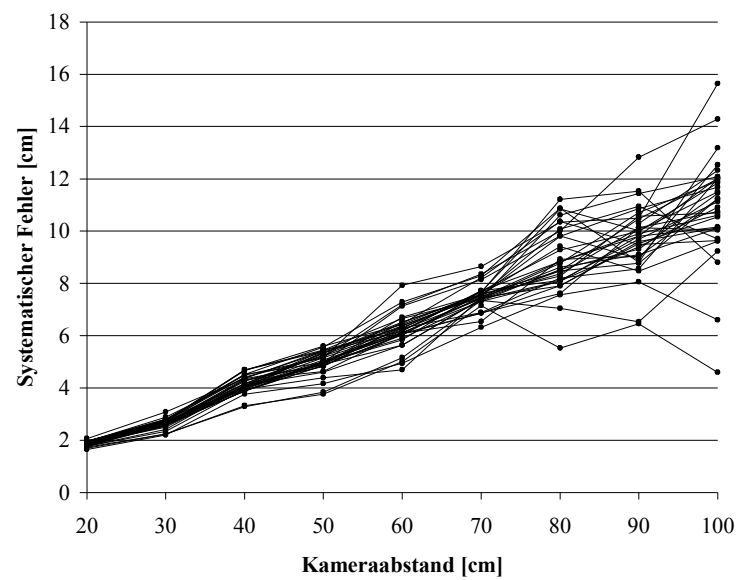


Abbildung 5.8: Systematischer Fehler der Abstandsmessung

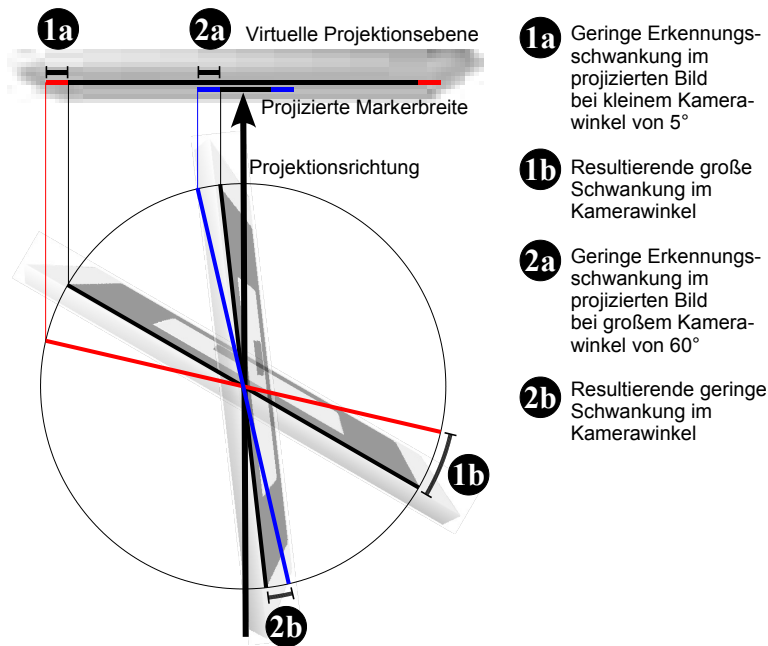


Abbildung 5.9: Auswirkungen von geringen Schwankungen auf die Winkelbestimmung

Gesamtheit der Standardabweichungen in Abhängigkeit vom Kamerawinkel dar. Aus diesem Diagramm wird ersichtlich, dass die Standardabweichung der Winkelmessung mit steigendem Kamerawinkel abnimmt. Der Bereich von 40° bis 90° hebt sich dabei durch eine geringe Standardabweichung hervor.

Diese Eigenschaft des markerbasierten Tracking lässt sich durch die Auswirkungen geringer Änderungen in der Erkennung der projizierten Darstellung erklären. Die Auswirkungen solcher geringer Schwankungen auf die Winkelbestimmung ist bei kleinem Kamerawinkel wesentlich größer, als bei großem Kamerawinkel. Dieser Zusammenhang wird in [Abbildung 5.9](#) verdeutlicht.

Im Diagramm der Standardabweichung der Abstandsmessung (siehe [Abbildung 5.6](#)) wurde für jeden Kamerawinkel eine Kurve eingetragen, die den Verlauf der Standardabweichung über die unterschiedlichen Abstände darstellt. Das Diagramm stellt die Gesamtheit der Standardabweichungen in Abhängigkeit vom Kameraabstand dar. Mit Hilfe dieser Darstellung der Messergebnisse wird ersichtlich, dass die Standardabweichung der Abstandsmessung mit dem Kameraabstand zunimmt, und somit die Güte der Messung abnimmt. Der Bereich, bei dem der Kameraabstand geringer als 50 cm ist, hebt sich dabei durch die geringe Standardabweichung hervor.

Auch diese Eigenschaft lässt sich durch die Auswirkungen geringer Änderungen in der Erkennung der projizierten Darstellung erklären. Die Auswirkungen solcher geringer Schwankungen auf die Abstandsbestimmung ist bei kleinem Kameraabstand wesentlich geringer, als bei großem Abstand. Dieser Zusammenhang wird in [Abbildung 5.10](#) verdeutlicht.

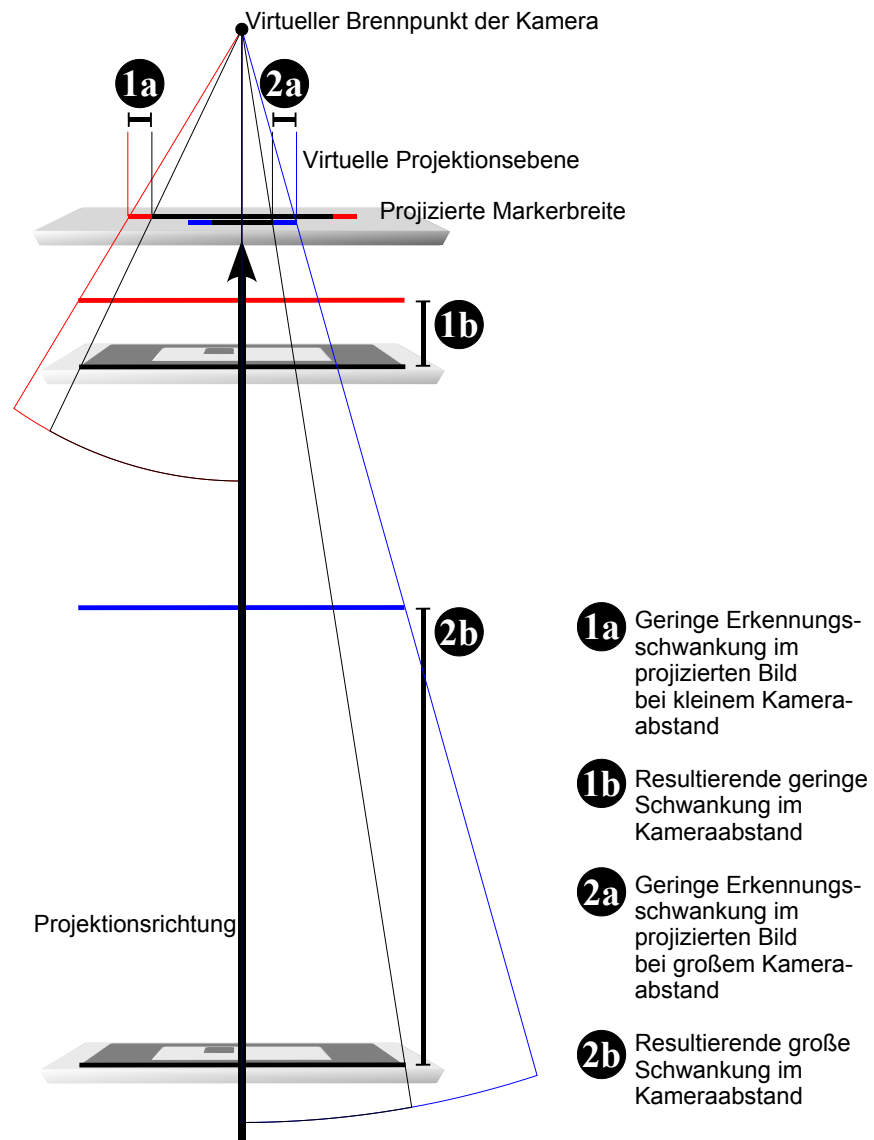


Abbildung 5.10: Auswirkung von geringen Schwankungen auf die Abstandsbestimmung

In [Abbildung 5.7](#) wurde zu jedem Kameraabstand eine Kurve eingetragen, die den Verlauf des Fehlers über die einnehmbaren Abstände wiedergibt. Das Diagramm stellt die Gesamtheit der systematischen Winkelfehler in Abhängigkeit vom Kamerawinkel dar, wobei der Bereich zwischen 40° und 50° einen geringen systematischen Fehler aufweist.

Die einzelnen Kurven im Diagramm des systematischen Fehlers der Abstandsmessung (siehe [Abbildung 5.8](#)), entsprechen dem Fehlerverlauf bei gleich bleibendem Kamerawinkel. Das Diagramm selbst stellt die Gesamtheit der systematischen Abstandsfehler in Abhängigkeit vom Kameraabstand dar. Aus dieser Darstellung wird ersichtlich, dass der systematische Fehler der Abstandsmessung mit zunehmenden Kameraabstand wächst. Auch hier wird der Bereich mit dem Abstand von weniger als 70cm hervorgehoben, da dort der systematische Fehler gering ist.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich bei den Messungen verschiedene Winkel- und Abstandsbereiche hervorgehoben haben, in denen die Markererkennung geringen Schwankungen, bzw. geringen systematischen Fehlern unterliegen. Die nun zu bestimmende Gütefunktion wird den Trackingangaben von Markern in diesen Bereichen einen größeren Gütewert zuordnen. Dabei steigt die Qualität der Markererkennung mit der Anzahl der erfüllten Kriterien:

- Geringer systematischer Fehler des Kamerawinkels (bei einem Abstand unter 70cm)
- Geringe Standardabweichung des Kamerawinkels (bei einem Abstand unter 50cm)
- Geringer systematischer Fehler des Kameraabstandes (bei einem Winkel von 40° bis 50°)
- Geringe Standardabweichung des Kameraabstandes (bei einem Winkel von 45° bis 90°)

Die Gütefunktion wird somit eine Unterteilung in 5 Qualitätsabstufungen durchführen, die sich auf diese Kriterien bezieht.

- Keines der Kriterien trifft zu (Qualität = 0; schlecht)
- Ein Kriterium trifft zu (Qualität = 1)
- Zwei Kriterien treffen zu (Qualität = 2)
- Drei Kriterien treffen zu (Qualität = 3)
- Alle Kriterien treffen zu (Qualität = 4; gut)

In [Abbildung 5.11](#) wird die Kombination der Qualitätskriterien visualisiert. Die Abbildung stellt dazu alle Abstands- und Winkelbereiche der Messungen dar. Sind dabei in einem Bereich der Messung mehrere Kriterien erfüllt, so ist der Bereich entsprechend

dunkler eingefärbt. Je dunkler also die Bereiche eingefärbt sind, desto besser ist die Qualitätseinstufung der Markererkennung und somit auch der Gütewert der entsprechenden Trackingangabe. Diese Qualitätsabstufung stellt nun die Realisierung der Gütefunktion für die Marker mit einer Größe von 55mm dar. Dabei kann mit Hilfe der Trackingangabe eines Markers der Kameraabstand und der Kamerawinkel berechnet werden, um diese Werte daraufhin zu überprüfen, ob sie in die jeweiligen Bereiche fallen.

Kommen in der Anwendung auch Marker zum Einsatz, deren Größe sich von 55mm unterscheiden, kann teilweise diese Gütefunktion auch auf Marker anderer Größe angewendet werden. Dazu wird die projizierte Größe eines Markers (also die Darstellung eines Markers im Videobild) mit der projizierten Größe eines 55mm großen Markers verglichen. Sind die Darstellungen im Videobild gleich, auch wenn die Marker eine andere Größe besitzen (wie in [Abbildung 5.12\(a\)](#) dargestellt), werden die gleichen Schwankungen in der Orientierungsbestimmung bei beiden Markern auftreten. Wird eine Änderung in der projizierten Darstellung vom Trackingsystem erkannt, die beispielsweise durch Pixelrauschen verursacht wird, und mit einer Drehung von beispielsweise 30° des Markers mit Abstand interpretiert wird, dann würde diese Drehung auch dem entsprechenden 55mm großen Marker im Abstand A zugesprochen werden (siehe [Abbildung 5.12\(b\)](#)). Somit wären die erkannten Winkeländerungen der beiden Marker identisch, womit auch Schwankungen in der Darstellung der Marker, identische Auswirkungen auf die Orientierungsschwankungen hätten.

Im Falle der Orientierungsschwankungen verhält sich somit der entsprechende 55mm große Marker, wie der Marker, der die gleiche Darstellung im Videobild einnimmt.

Bei der Schwankung in den Positionierungsangaben verhält sich die Beziehung anders. Ein beispielsweise 100mm großer Marker besitzt eine wesentlich größere Positionierungsschwankung als der entsprechende (mit gleicher projizierten Größe) 55mm große Marker. Allerdings sind diese Schwankungen im Verhältnis zur Positionierung gleich. Besitzt ein 55mm großer Marker eine 5% ige Schwankung in der Positionserkennung, dann besitzt der entsprechende positionierter 100mm großer Marker ebenfalls ein 5% ige Schwankung in der Positionserkennung.

Ein vereinfachter Ansatz, Marker mit anderen Größen mit Hilfe der Gütefunktion zu bewerten, wäre somit dadurch gegeben, den entsprechenden 55mm großen Marker zu bestimmen (der die gleiche projizierte Darstellung besitzt, wie der Marker anderer Größe) und den Gütewerte dieses Markers zu übertragen. Anhand des Strahlensatzes lässt sich der entsprechende Marker leicht bestimmen. [Abbildung 5.12\(a\)](#) zeigt die Beziehung zwischen zwei entsprechenden Markern, wobei der Marker mit Abstand A , der entsprechende Marker der Größe $a = 55mm$ darstellt. Der Abstand B ist durch die Trackingangaben des Markers gegeben und dessen Markergröße b ist ebenfalls bekannt. Der zu bestimmende Markerabstand A kann mit Hilfe des Strahlensatzes bestimmt werden.

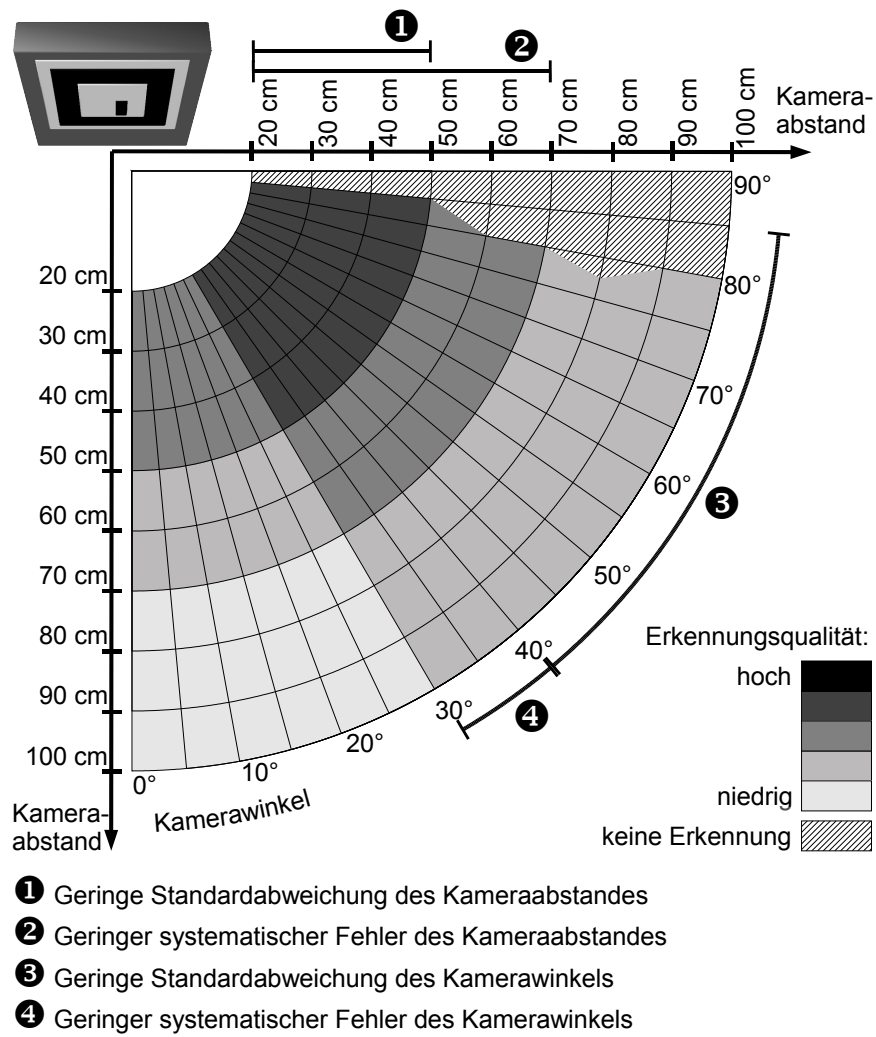


Abbildung 5.11: Visualisierung der Güteverteilung

$$\frac{a}{A} = \frac{b}{B} \quad (5.1)$$

$$\Rightarrow A = \frac{a}{b} \cdot B \quad (5.2)$$

Mit Hilfe dieser Umrechnung kann nun der entsprechende 55mm große Marker bestimmt werden, wodurch vereinfachte Erweiterung der Gütefunktion auf beliebige Markergrößen erreicht wird.

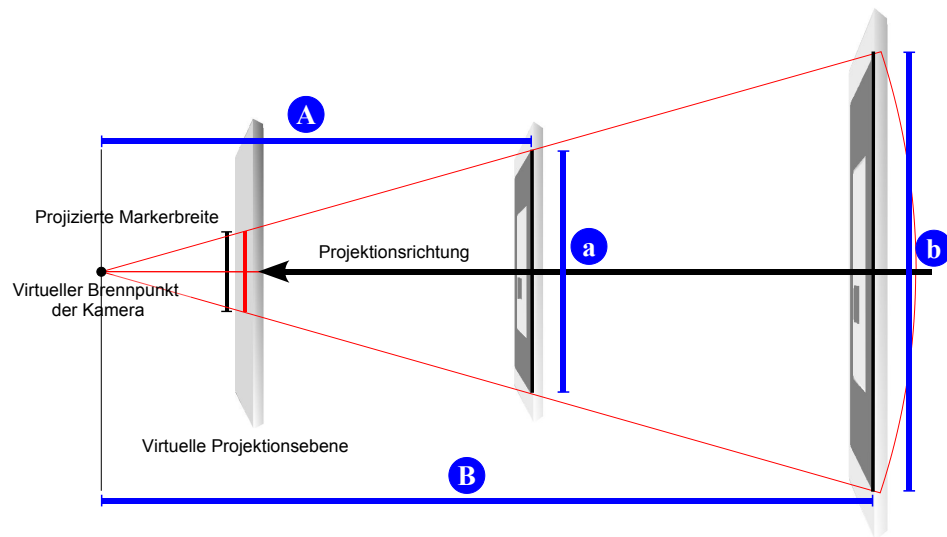
Bietet das zugrunde liegende Trackingsystem auch Informationen darüber, wie sicher die Erkennung des Musters eines Markers ist, wie es beispielsweise beim ARToolKit-System durch den „Confidence Value“ [KBP00a] beim Markertracking realisiert wird, sollte dieser Wert in die Gütefunktion integriert werden. Eine Möglichkeit ist, die beiden Werte der Zuordnungssicherheit und der Trackingqualität bei der Güteberechnung gleich zu gewichten. Da die beste Trackingqualität eines Markers keinen Wert besitzt, wenn das Trackingsystem keine sichere Zuordnung der Trackingangabe durchführen kann.

Mit Hilfe dieser Gütefunktion kann der Autor während des Erstellungsprozesses auch die Gütewerte der einzelnen Marker dargestellt bekommen, wie es in [Abbildung 5.13](#) gezeigt wird. Zum einen wird der Zahlenwert der Güte an der Position des Markers angezeigt, damit auch eine offensichtliche Zuordnung der Werte gegeben ist, und zum anderen wird durch die virtuelle Einfärbung des Markers die Güte visualisiert. Dabei erzeugt der Gütewert, der für die beste Qualität der Trackinginformation steht, eine grüne Färbung und die schlechteste Qualität eine rote Einfärbung. Die Zwischenwerte werden entsprechend interpoliert.

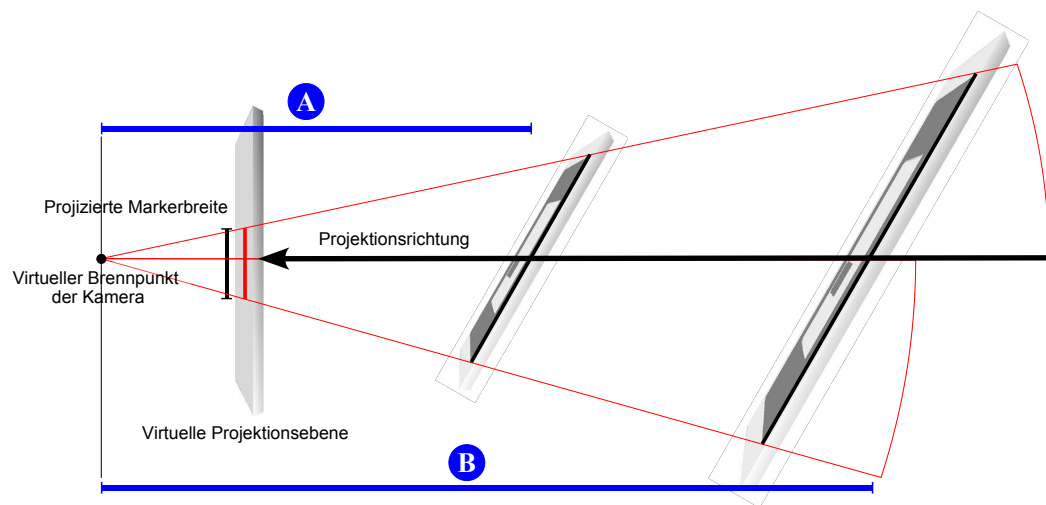
5.3 Redundante Markerkombination

Durch das eingeschränkte Sichtfeld der Videokamera kann ein Marker nicht immer erfasst werden und die von der Erfassung abhängige Bestimmung von Positionierungs- und Orientierungsangaben kann somit nicht durchgeführt werden. Das Tracking kann durch Verdeckung des Markers, oder auch durch schlechte Lichtverhältnisse verhindert werden. Der Anwendungsfall des Orbiting (der dynamischen Betrachtung eines Objektes von verschiedensten Blickwinkeln) stellt ein Beispiel dar, bei dem ein kontinuierliches Tracking vorausgesetzt wird, aber nicht mit dem Tracking eines einzelnen Markers erreicht werden kann. Durch das Kombinieren von den Trackingangaben mehrerer Marker kann allerdings ein kontinuierliches Tracking ermöglicht werden. Außerdem wird dabei auch das Problem der Verdeckung einzelner Marker behoben.

Wie im Konzept [Abschnitt 4.3](#) beschrieben, werden dazu Marker kombiniert, die eine wohldefinierte relative Positionierung und Orientierung (den so genannten Offset) zu-



(a) Äquivalente Marker



(b) Gleiche Orientierungsänderung äquivalenter Marker

Abbildung 5.12: Relativierung des Gütevalues



Abbildung 5.13: Visualisierung der Gütwerte

einander besitzen. Diese relativ starre Ausrichtung wird dazu genutzt, aus den Trackingangaben der einzelnen Marker und deren Offset, eine einheitliche Trackinginformation zu kombinieren, so dass für die Markerkombination ein einheitliches Koordinatensystem zur Verfügung steht.

An dieser Stelle wird nun die Realisierung des Konzeptes der Markerkombination beschrieben und wie der Autor damit arbeiten kann. Dazu wird zunächst ausgeführt, wie die automatisierte Auswahl der Trackingangaben umgesetzt wird.

5.3.1 Automatisierte Markerauswahl

Für das automatisierte Kombinieren der Trackinginformation stehen der Markerkombination die Trackingangaben der einzelnen Marker zur Verfügung, die von der Markerkombination an den Schnittstellen abgegriffen werden, an denen auch dem Autor diese Informationen zur Verfügung gestellt werden. Diese Trackingangaben beinhalten dann die Informationen über das Erkennungsverhalten des Markers (ist der Marker vom Trackingsystem erkannt worden und kann die Position des Markers bestimmt werden) und der Positionierung und Orientierung des Markers. Dass diese Positionierung und Orientierung in verschiedenen Formaten präsentiert werden kann, wurde im Abschnitt zur Filterung der Angaben schon festgestellt. Dabei sind diese unterschiedlichen Präsentationen ineinander überführbar, so dass die Angabe der Position in Form von x-, y- und z-Koordinaten, und die Angabe der Orientierung in Form von Quaternionen angenommen werden kann (siehe dazu [Unterabschnitt 5.1.1](#)).

Die Trackingangaben des Markers, die den größten Gütwert liefern, werden mit dessen Offset kombiniert, um die Vereinheitlichung der Trackingangabe der Markerkombination zu erreichen. Dies geschieht zum einen durch die Addition der Positionsangaben



Abbildung 5.14: Optionsdialog der Markerkombination

vom Tracking mit den Positionsangaben des Offset, und zum anderen durch die Addition der Quaternionen der Orientierungsangaben.

Die zweite Variante der Vereinigung der Trackingangaben (wie in [Unterabschnitt 4.3.1](#) beschrieben) kombiniert alle Trackingangaben der einzelnen erkannten Marker, in dem die Positionierungs- und Orientierungsangaben mit dem entsprechenden Gütewert gewichtet werden.

Dem Autor wird die vereinheitlichte Trackingangabe dann in Form der Positionierungs- und Orientierungsangaben zur Verfügung gestellt. Wobei er über einen Optionsdialog die Einstellungen durchführen kann, welche der beiden Kombinationsvarianten angewendet werden sollen [Abbildung 5.14](#).

5.3.2 Interaktives Kombinieren von Markern

Die eigentliche Auswahl oder Vereinigung von Trackingangaben findet automatisiert im Hintergrund statt. Der Autor kann an der Schnittstelle der Markerkombination die erforderlichen Informationen über die Trackingangaben abfragen. Wie die Hilfestellung umgesetzt wird, die dem Autor angeboten werden soll, um ihm einerseits die Erstellung, und andererseits die Erweiterung und Anpassung der Markerkombination zu ermöglichen, wird im Folgenden beschrieben.

Die interaktive Erweiterung der Markerkombination wird durch die Auswahl eines Markers im Videofenster ausgelöst, dieser Auslösemechanismus ist insofern sinnvoll, da nur Marker zur Kombination hinzugefügt werden können, wenn deren Offset zu den anderen Markern der Kombination bestimmt werden kann. Diese Offsetbestimmung ist nur dann möglich, wenn der Marker Trackingangaben bietet.

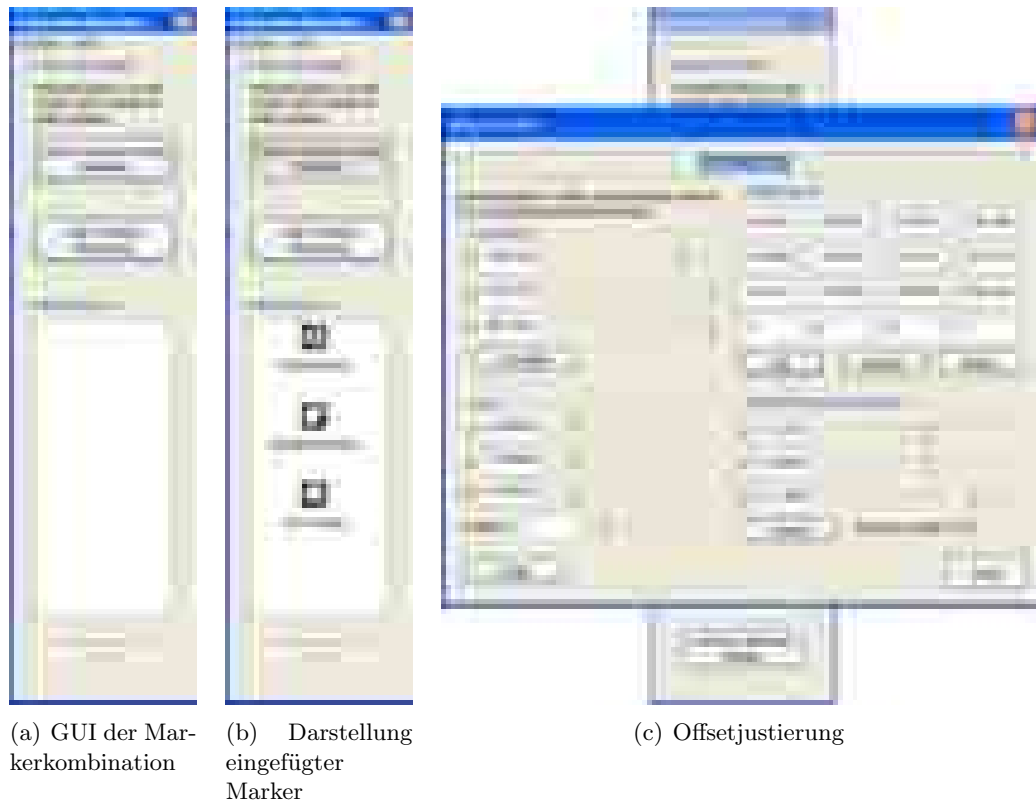


Abbildung 5.15: GUI der Markerkombination

Da nicht alle Auswahlereignisse von Markern während der Erstellung einer MR-Anwendung zu einer Erweiterung der Markerkombination führen soll, kann der Autor die interaktive Erweiterung mit Hilfe eines Buttons aktivieren und deaktivieren (siehe [Abbildung 5.15\(a\)](#)).

Die Markerkombination startet die Erweiterung nach dem Auswahlereignis und beginnt dabei den Offset des neuen Markers zum einheitlichen Koordinatensystem der Kombination zu bestimmen. In Abhängigkeit von den Einstellungen, die der Autor in den Optionen der Markerkombination durchgeführt hat, wird dazu eine Trackingangabe verwendet und der Offset daraus bestimmt, oder eine bestimmte Anzahl von Trackingangaben verwendet, die dann anschließend gemittelt werden. Zur Mittelwertbildung speziell bei den Orientierungsangaben werden dazu die Quaternionendarstellungen genutzt. Den Fortschritt der Offsetbestimmung bekommt der Autor durch die Darstellung einer Statusanzeige, wie es in [Abbildung 5.16\(a\)](#) im Videobild verdeutlicht wird, wobei die Statusanzeige am Ende der Offsetbestimmung ausgeblendet wird und der neu eingefügte Marker in der Auflistung der Kombination erscheint.

Nachdem ein Marker in die Kombination aufgenommen wurde, kann der Autor den Offset auch manuell setzen, falls ihm beispielsweise diese Angaben durch Messungen

bekannt sind. Dazu kann der Autor den jeweilige Marker in der Auflistung (wie sie in [Abbildung 5.15\(b\)](#) dargestellt ist) auswählen und über einen Menüeintrag ein Werkzeug zur Manipulation der Offsetwerte öffnen. In diesem Werkzeug sind die Offsetangaben in Form einer Transformationsmatrix dargestellt, die direkt über Matrizeneinträge, oder über die Eingabe von Translations- und Rotationswerten manipuliert werden können (siehe [Abbildung 5.15\(c\)](#)). Um das Ergebnis dieser Manipulation zu überprüfen, kann der Autor die Offsetvisualisierung im Optionsdialog aktivieren und erhält eine Darstellung, wie sie in [Abbildung 5.17\(a\)](#) gezeigt ist. Der Offset jedes einzelnen Markers wird dabei anhand einer Linie, die im Mittelpunkt des Markers anfängt und mit dem Namen des Markers beschriftet wird dargestellt. Dabei wird der Offset des Markers hervorgehoben, der für die Trackingangaben der Kombination ausgewählt wurde.

Eine weitere Funktion der Markerkombination liegt in der nachträglichen Offsetbestimmung aller bereits eingefügten Marker. Diese Funktion kann vom Autor über einen Menüeintrag gestartet werden. Dabei wird wiederum eine bestimmte Anzahl von einzelnen Offsetbestimmungen für jeden einzelnen Marker der Kombination durchgeführt, die vom Autor im Optionsdialog festgelegt werden kann. Um dem Autor dabei zu verdeutlichen, wie weit diese Offsetbestimmung fortgeschritten ist, wird für jeden Marker eine Statusanzeige im Videobild geboten. Die Anzeigen weisen eine unterschiedliche Einfärbung auf, je nachdem ob die Offsetbestimmung für den jeweiligen Marker beendet ist, ob sie noch durchgeführt wird, oder ob die Offsetbestimmung noch nicht beendet ist, aber keine aktuellen Trackinginformationen zur Verfügung stehen (siehe [Abbildung 5.16\(a\)](#)).

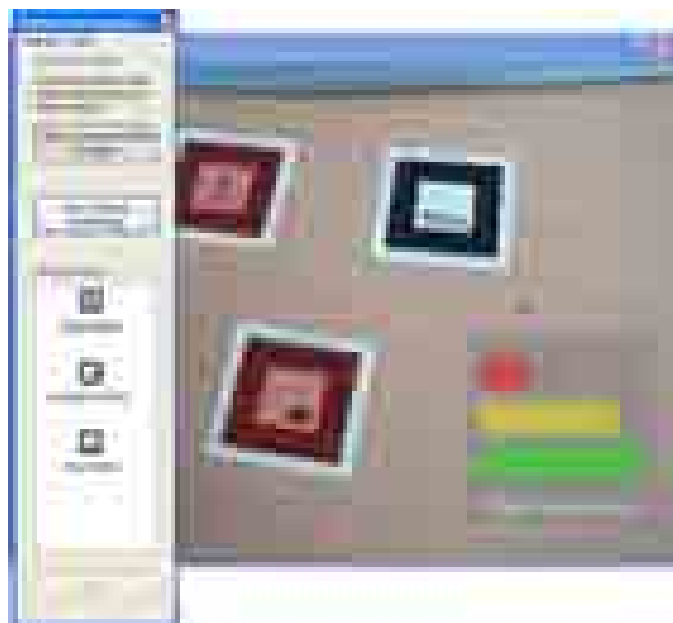
Spezielle Orbitingunterstützung

Im Konzept der redundanten Markerkombination wird dem Autor ein Werkzeug zur Hand gegeben, dass ihm bei der Erstellung von Markerkombinationen unterstützt, die für den speziellen Anwendungsfall des Orbiting eingesetzt werden. In der Realisierung der Markerkombination kann diese Unterstützung aus dem GUI-Dialog per Knopfdruck gestartet werden (siehe [Abbildung 5.18\(a\)](#)). Der Autor aktiviert damit die Überprüfungsphase der Markerkombination, in der er dazu aufgefordert wird die Anwendersicht zu simulieren, die ein Anwender in der Applikation einnehmen würde, in der die Markerkombination zum Einsatz kommt. Dabei überwacht das Werkzeug die erkannten Marker und deren Gütewerte, um bei einer Unterschreitung eines festgelegten Minimalwertes auf eine Schwachstelle der Markerkombination hinzuweisen, wie es in [Abbildung 5.19\(a\)](#) gezeigt wird. Zur Überwachung der Markerkombination wird auch die Anzahl der vom Trackingsystem erkannten Marker kontrolliert. Wird zu einem Zeitpunkt der Simulation nur noch ein Marker der Kombination erkannt, wird auch auf diese Schwachstelle hingewiesen.

Dem Autor wird beim Erkennen einer Schwachstelle der Markerkombination die Möglichkeit gegeben, diese zu beseitigen, indem er einen weiteren Marker in die Kombination aufnimmt. Entschließt sich der Autor die erkannte Schwachstelle zu beseitigen, wird er dazu aufgefordert den Marker zu bestimmen, der in die Kombination neu aufgenommen werden soll. Dies geschieht in [Abbildung 5.19\(b\)](#) durch die Wahl einer Datei, die die Daten zu dem neuen Marker enthalten.



(a) Statusanzeige bei der Offsetbestimmung



(b) Statusanzeige bei der globalen Offsetbestimmung

Abbildung 5.16: Videobilddarstellungen der Markerkombination



(a) Visualisierung der Offsets

Abbildung 5.17: Videobilddarstellungen der Markerkombination

Nach der Wahl des Markers, wird dem Autor durch eine Visualisierung eine Position vorgeschlagen, an der der neue Marker installiert werden soll, um eine möglichst gute Trackingangabe (im Sinne des Gütewertes) von dieser Position aus zu erlangen. Eine perspektivische Darstellung einer halbtransparenten quadratischen Fläche (in der Größe des Markers), ermöglicht es dem Autor die Positionierung und Orientierung des Markers so vorzunehmen, dass diese den Angaben des Werkzeuges entsprechen (siehe dazu [Abbildung 5.19\(c\)](#) und [Abbildung 5.20\(a\)](#)).

Die Visualisierung ist dabei nicht starr an den Kamerablickwinkel gebunden, sondern an der Positions- und Orientierungsangabe der Markerkombination. Ist einmal die gewünschte Position des neuen Markers bestimmt, kann somit die Kamera bewegt werden, um beispielsweise die Positionierung und Orientierung des neuen Markers zur Visualisierung überprüfen zu können. Diese relative Positionierung der Visualisierung wird durch die Berechnung eines Offsets zwischen den Angaben der Markerkombination und der gewünschten Positionierung der Visualisierung ermöglicht. Dieser relative Offset der Visualisierung zur Markerkombination wird dann den Trackingangaben der Markerkombination hinzuaddiert, um an der entsprechenden Position die Darstellung der halbtransparenten Fläche zu ermöglichen.

Ist der neue Marker vom Autor entsprechend der Darstellung installiert worden, kann der Autor die Erweiterung der Markerkombination per Knopfdruck bestätigen (siehe [Abbildung 5.20\(a\)](#)). Das Werkzeug startet daraufhin die Offsetbestimmung des neuen Markers, wie sie auch bei der interaktiven Erweiterung der Markerkombination durch-



(a) Orbiting



(b) Gestartete Überwachung mit Erkennungsanzeige

Abbildung 5.18: Orbitingwerkzeug



(a) Erkennung einer Schwachstelle

(b) Auswahl des neuen Markers



(c) Positionierungsunterstützung

Abbildung 5.19: Orbitingwerkzeug



(a) Positionierter neuer Marker



(b) Einfügevorgang des neuen Markers

Abbildung 5.20: Orbitingwerkzeug

geführt wurde. Damit ist der neue Marker in die Kombination aufgenommen und die Schwachstelle des Tracking an dieser Position beseitigt. Der Autor kann somit das Orbitingwerkzeug beenden oder mit dem Orbitingvorgang fortfahren, um die Kombination nach weiteren Schwachstellen zu untersuchen.

5.4 Markertupel als Trackinginformation

Das Konzept der Markertupel, bei dem die Trackinginformation aus einem Bereichsmarker und einem Positionsmarker kombiniert werden, hat das Ziel der Wiederverwendung von Markern. Dazu wird der Trackingbereich vom Autor in strikt getrennte Bereiche unterteilt die nicht voneinander aus einsehbar sind (z.B. die Zimmer eines Flures, oder die Stockwerke eines Gebäudes). Die Marker eines Bereiches können dann in einem anderen Bereich wieder verwendet werden. Dabei wird anhand des Bereichsmarkers festgestellt in welchen Bereich sich das Markertupel befindet.

Im Folgenden wird die Umsetzung des Werkzeuges gezeigt, welches dem Autor die Erzeugung und Verwaltung dieser Markertupel zur Verfügung stellt.

Aufgabe des Markertupelwerkzeuges ist es zunächst einmal sämtliche zur Verfügung stehenden Marker des Trackingsystems zu verwalten. Hierzu bietet das Werkzeug ein GUI an, die zum einen die Marker des Systems auflistet und zum anderen die Bereichs- und Positionsmarker (siehe [Abbildung 5.21\(a\)](#)). Die Bereichs- und Positionsmarker werden dem Autor in einer Baumstruktur dargeboten, die den Zusammenhang zwischen den Markern wiedergibt. Die Positionsmarker eines Bereiches sind unterhalb des entsprechenden Bereichsmarkers dargestellt, somit kann der Autor auch die Positionsmarker eines Bereiches komplett ausblenden.

Der Fundus der zur Verfügung stehenden Marker des Systems kann durch den Autor manuell erweitert und angepasst werden. Der Autor kann einen neuen Marker in den Fundus übernehmen und anschließend dessen Eigenschaften, wie dessen angezeigter Name oder das verwendete Markermuster, anpassen. Eine andere Möglichkeit den Fundus an Markern aufzustocken, besteht darin eine automatisierte Suche durchzuführen, die vom Autor über einen Menüeintrag gestartet werden kann. Das Werkzeug stellt dafür eine Anfrage an das Trackingsystem und listet die entsprechenden Marker auf.

5.4.1 Interaktives Anfordern von Markertupeln

Ist der Fundus an Markern festgelegt, kann der Autor mit der Erstellung von Bereichen und Markertupeln beginnen. Das Markertupelwerkzeug ermöglicht dem Autor dabei das anfordern von neuen Bereichsmarkern, die dann an der untersten Ebene der Baumdarstellung erscheinen. Dabei durchsucht das Werkzeug den Fundus nach ungenutzten Markern, da ein neuer Bereichsmarker, laut den Integritätsregeln in [Unterabschnitt 4.4.2](#), in keinem anderen Bereich als Positionsmarker verwendet werden darf. Die Trackinginformationen des erzeugten Bereichsmarkers werden von nun an vom Werkzeug überwacht, um feststellen zu können, dass der neu eingerichtete Bereich aktiviert ist.



(a) Liste des Markerfundus und die Baustruktur der Tupel (b) Aktivierter Anfragebutton bei selektierem Bereich

Abbildung 5.21: Dialogfenster des Markertupelwerkzeuges

Auf gleiche Art kann der Autor einen Positionsmarker in einem Bereich anfordern. Dazu wählt er den Bereich aus und drückt den entsprechenden Button im Dialogfenster (siehe [Abbildung 5.21\(a\)](#)). Wiederum durchsucht das Werkzeug den Fundus nach einem verwendbaren Marker (nach den Integritätsregeln in [Unterabschnitt 4.4.2](#)) und erzeugt dem Autor eine entsprechende Schnittstelle für die Trackingangaben des erzeugten Markertupels. Dabei werden die Marker des Fundus bevorzugt, die schon in anderen Bereichen verwendet werden, womit die Anzahl der wieder verwendbaren Marker so groß wie möglich gehalten wird.

5.4.2 Automatisierte Zuordnung von Trackinginformationen

Schon während des Erstellungsprozesses von Bereichsmarkern und Positionsmarkern ordnet das Markertupelwerkzeug die Trackinginformation den entsprechenden Schnittstellen zu. Der Autor kann somit schon mit den Trackinginformationen der erstellten Markertupel arbeiten, auch wenn andere Bereiche noch nicht genauer definiert, oder noch nicht alle Positionsmarker des Bereiches erstellt wurden. Das Markertupelwerkzeug kann nur dann diese Aktivierung der Schnittstellen nicht durchführen, wenn die Angaben zum aktiven Bereich nicht eindeutig sind. Wurden beispielsweise die Bereiche vom Autor so gewählt, dass die Markertupel aus verschiedenen Bereichen gleichzeitig sichtbar sind, ist nicht eindeutig zu klären welcher Bereich der aktuelle ist. In solchen Konfliktsituationen wird der Autor auf die fehlerhafte Bereichsunterteilung hingewiesen werden, wie in [Abbildung 5.22](#) dargestellt wird.



Abbildung 5.22: Anzeige des aktuellen Bereichs

Kapitel 6

Implementierung

Im Kapitel der Implementierung wird die spezielle Umsetzung der entwickelten Konzepte in der AMIRE-Architektur beschrieben. Dabei wurden alle entwickelten Konzepte über den Prototypenstatus hinaus realisiert und stehen zum Einsatz in der AMIRE-Autorenumgebung zur Verfügung. Auf Grund der umfangreichen Implementierung wird in diesem Kapitel lediglich auf die Besonderheiten der Komponenten eingegangen.

Dazu wird zunächst eine kurze Einleitung in das AMIRE-Projekt gegeben, wobei deren Ziele und entwickelten Konzepte beschrieben werden, um daraufhin die AMIRE-Architektur betrachten zu können. Speziell wird dabei auf die AMIRE-Autorenumgebung und deren Funktionalität eingegangen.

Basierend auf dieser Einleitung folgt die Beschreibung der implementierten Komponenten, die anhand der Kommunikationsschnittstellen und deren Funktionsweise erläutert werden. Dazu wird auch auf die Struktur der einzelnen Komponenten eingegangen und deren Zusammenspiel in der AMIRE-Umgebung. Zum Abschluss wird auf die Restriktionen und Probleme der Implementierung hingewiesen, die durch die Wahl der AMIRE-Architektur entstanden sind.

6.1 Das AMIRE-Projekt

Ziel des AMIRE-Projektes (Authoring Mixed Reality) [[AMI04b](#)] (beschrieben in [[ADHZ04](#), [GHPR02](#), [AD04](#), [ADG⁺02](#), [DGHP03](#)]), ist es nicht neue Basistechnologien im MR-Bereich zu entwickeln, sondern vielmehr die bestehenden Lösungen so anzupassen, dass sie einem breiten Kreis von Autoren zur Entwicklung von MR-Anwendungen zur Verfügung gestellt werden können. Dazu wird eine komponentenbasierte Entwicklung von MR-Anwendungen herangezogen, die einen hohen Grad an Wiederverwendbarkeit einzelner Anwendungsbausteine verspricht.

Das Projekt widmet sich speziell den Interaktionsmöglichkeiten zwischen Mensch und Computer in einer Autorenumgebung und entwickelt daraus effiziente Produktionsprozesse, die einen optimierten Ablauf von Arbeitsschritten zur Entwicklung von MR-Anwendungen ermöglichen. Zentraler Punkt bei diesem Produktionsprozess ist auch die Wiederverwendung und Anpassung von Anwendungsbausteinen.

Dieses Komponentenkonzept greift dabei in der AMIRE-Architektur auf verschiedenen Autorenebenen. Diese verschiedenen Ebenen lassen Komponenten in unterschied-

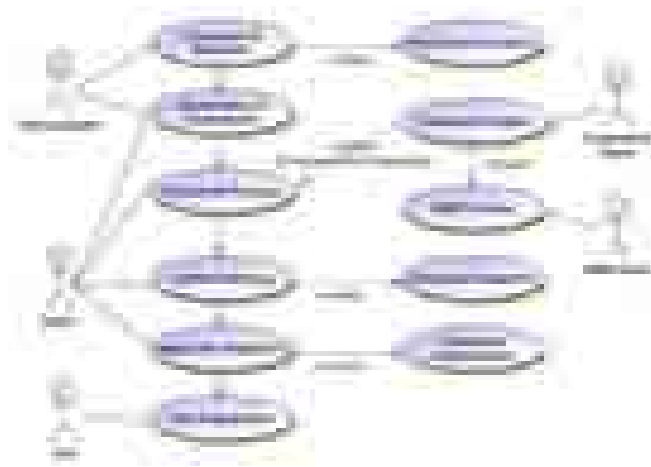


Abbildung 6.1: Autorenrollen [GHPR02]

licher Granularität zu, die von den unterschiedlichen Autoren erstellt werden können. Die Funktionalität der verschiedenen Komponenten wird dazu im [Unterabschnitt 6.1.1](#) beschrieben.

Eine Aufteilung der Autorenrollen des Produktionsprozesses wird von Grimm et al. [GHPR02] beschrieben (hier in [Abbildung 6.1](#) dargestellt) und zeigt das Zusammenspiel der einzelnen Autoren, die in dem Produktionsprozess beteiligt sind.

Der Produktionsprozess selber wird hierzu in Phasen der Qualifikation, Adaption, Kombination und Kalibrierung unterteilt, um dem Autor eine klar strukturierte Erstellung der MR-Anwendung zu ermöglichen (siehe [Abbildung 3.24](#) in der die ersten drei Phasen abgebildet sind).

Qualifikation In der Phase der Qualifikation ist es die Aufgabe des Autors, die benötigten MR-Komponenten zu identifizieren, die in der MR-Anwendung zum Einsatz kommen sollen. Diese Komponenten werden bei Bedarf durch die MR-Experten implementiert oder angepasst.

Adaption In der Adaptionphase besteht die Aufgabe des Autors in der Anpassung der Komponenten, die dem Autor in Form von Bibliotheken zur Verfügung gestellt werden. Dazu werden vom Autorensystem Werkzeuge bereitgestellt, die diese Anpassung ermöglichen.

Kombination In der Kombinationsphase legt der Autor die Beziehungen zwischen den einzelnen Komponenten fest. Dazu bieten die einzelnen Komponenten Schnittstellen, die eine Interaktion untereinander ermöglichen.

Kalibrierung In der Phase der Kalibrierung findet die Ausrichtung von virtuellen und realen Objekten der MR-Anwendung statt.

Die Reihenfolge dieser Phasen kann dabei vom Autor variiert werden, wodurch auch bereits entwickelte Anwendungen den Anforderungen angepasst werden können, oder die Anwendung durch einen iterativen Verfeinerungsprozess ausgebaut werden können.

Im AMIRE-Projekt wurde neben dieser konzeptionellen Arbeit auch eine Architektur entwickelt und umgesetzt, die eine Realisierung dieser Konzepte darstellt. Durch den Einsatz der dazu entwickelten Autorenumgebung, können MR-Anwendungen mit Hilfe von verschiedenen Werkzeugen erstellt werden. Der Aufbau der AMIRE-Architektur und die Funktionsweise des Frameworks werden im folgenden Abschnitt erläutert.

6.1.1 AMIRE-Architektur

Die AMIRE-Architektur bietet eine Anpassung der etablierten Methodologie der komponentenbasierten Software-Entwicklung [Bal00]. Diese Anpassung orientiert sich speziell an den Anforderungen der MR-Software-Entwicklung, und führt zu einer Unterscheidung von MR-Gems, MR-Komponenten und dem MR-Framework. Die Beschreibung und Funktion dieser Bausteine werden im Folgenden durchgeführt (nach [DGHP03, AMI04a]).

AMIRE-Gems

Die MR-Gems (Gem: engl. Juwel) stellen eine Kollektion von Software-Bausteinen dar, die effiziente Lösungen zu speziellen Problemen des MR-Bereichs bieten. Diese Lösungen kommen beispielsweise aus dem Bereich des Tracking von Markern im Videobild, oder auch aus dem Bereich der Integration von dezidierten 3D-Geometrien Dateiformaten. Die MR-Gems bieten somit den Einstiegspunkt zur Integration von bereits bestehenden Lösungsansätzen, die dann auch in verschiedenen Bausteinen der Anwendung zum Einsatz kommen können.

Die Gruppe der Gems, die die Funktionalität des Trackings realisieren, sollen an dieser Stelle gesondert betrachtet werden. Im AMIRE-Projekt wurden dazu ausschließlich bildorientierte Trackingverfahren betrachtet, da diese keine speziellen Hardwareinsatz oder spezielle Systemvoraussetzungen benötigen. Für das Tracking wurde hierzu auf das ARToolKit, das TRIP und das OpenCV Software-Paket zurückgegriffen.

Das ARToolKit Software-Paket [KBP00a] bietet ein vollständiges markerbasiertes Trackingsystem, zu dem auch noch weitere Werkzeuge zur Kalibrierung der Kamera und Werkzeuge zur Erstellung neuer Marker zur Verfügung gestellt werden. Das Trackingsystem arbeitet mit quadratisch umrandeten Mustern (siehe [Abbildung 6.2\(b\)](#)). Die Muster dienen zum einen für die Identifizierung des Markers, und zum anderen für die Bestimmung der Orientierung des Markers, da dazu der symmetrische Rahmen nicht alleine ausreicht.

TRIP (Target Recognition using Image Processing)[dIMH02] ist ebenfalls ein bildorientiertes Trackingsystem, das an der University of Cambridge entwickelt wurde und

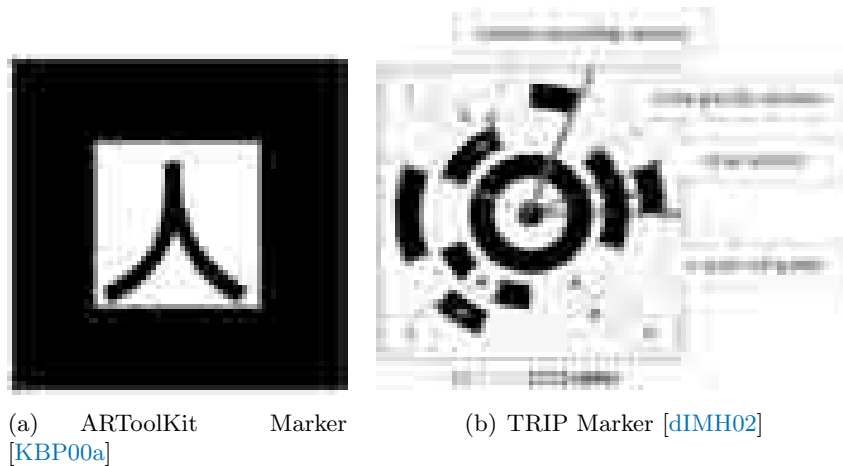


Abbildung 6.2: AMIRE Markertracking

das Tracking über größere Bereiche ermöglicht, wobei auch eine bessere Genauigkeit des Trackings erreicht werden kann als mit dem ARToolKit-System. Dafür werden konzentrische Kreismuster verwendet, wie sie in [Abbildung 6.2\(b\)](#) zu sehen sind. Die Kreismuster dienen dann auch zur Identifizierung der einzelnen Marker und geben durch ihren speziellen Aufbau auch die Orientierung des Kreismarkers wieder.

Die Computer Vision Bibliothek OpenCV [OPE04] stellt eine Alternative für ein komplettes bildorientiertes Trackingsystem dar, da es über die Funktionalitäten verfügt, die für die Methoden des bildorientierten Trackings erforderlich sind. Darunter fallen beispielsweise Algorithmen zur Konturenerkennung im Videobild, oder auch Methoden zur Kamerakalibrierung.

Innerhalb der AMIRE-Autorenumgebung, die im Folgenden noch beschrieben wird, kommt das ARToolKit-Trackingsystem zum Einsatz und wird aus diesem Grund auch für die Implementierung der erstellten Konzepte herangezogen.

AMIRE-Komponenten

Die MR-Komponenten des AMIRE-Konzepts, sind die Bausteine der MR-Anwendung, die von dem Anwendungsautor zusammengestellt und der Anwendung entsprechend angepasst werden. Die Komponenten selbst wiederum sind aus einem Netzwerk von Gems zusammengestellt, wobei die Anpassung und Implementierung dieser Komponenten, die Aufgabe der Komponenten-Entwickler ist. Diese Komponenten besitzen dabei ein einheitliches Schnittstelleformat, das zum einen die Konfiguration der einzelnen Komponenten erlaubt (über die so genannten Configuration Properties), um sie der Anwendung anpassen zu können, und zum anderen eine Interaktion zwischen den Komponenten ermöglicht, die über Verbindungen zwischen den so genannten In- und Out-Slots der Komponenten realisiert wird (siehe [Abbildung 6.3](#)).

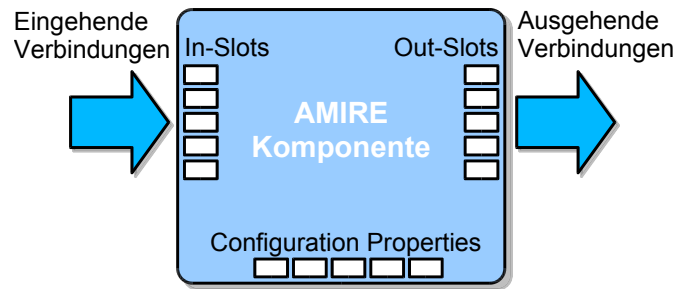


Abbildung 6.3: AMIRE-Komponente [AMI04a]

Dabei besitzen die einzelnen Schnittstellen standardisierte Datenformate, die zum einen aus Basisformaten bestehen.

- **Boolean property type** für boolesche Daten.
- **Integer property type** für Daten in Form von ganze Zahlen.
- **Float property type** für Daten in Form von Fließkommazahlen.
- **Double property type** für erweiterte Fließkommazahlen.
- **Character property type** für Daten in Form von einzelnen Zeichen.
- **String property type** für Daten in Form von Zeichenketten.

Und zum anderen können diese standardisierten Schnittstellen auch die Form einer strukturierten Kombination aus Basistypen besitzen. Hierzu dienen die so genannten **Structured base property types**, die einer bestimmten Struktur von Basistypen entspricht und die **Vector property types**, die einer Aufzählung von Basistypen beliebiger Anzahl entspricht.

Die Handhabung dieser Schnittstellen, worunter auch die Funktionalität fällt, die das Verbinden dieser Schnittstellen und das Übertragen deren Informationen ermöglicht, wird durch das zu Grunde liegende Framework ermöglicht.

AMIRE-Framework

Das AMIRE-Framework ist dabei ein zentraler Bestandteil des AMIRE-Konzepts. Es unterstützt die Gem-Entwicklung, indem es eine einfache und bequeme Weise zur Verfügung stellt, Gems zu integrieren. Es unterstützt die Komponenten-Entwicklung, indem es zum einen ermöglicht die Komponenten aus einzelnen Gems zusammen zu stellen und zum anderen Werkzeuge zur Verfügung stellt, um Schnittstellen zu den Komponenten zu definieren. Das AMIRE-Framework ermöglicht dem Komponenten-Entwickler, Verbindungen zwischen Komponenten herzustellen und komplexe Komponenten aus

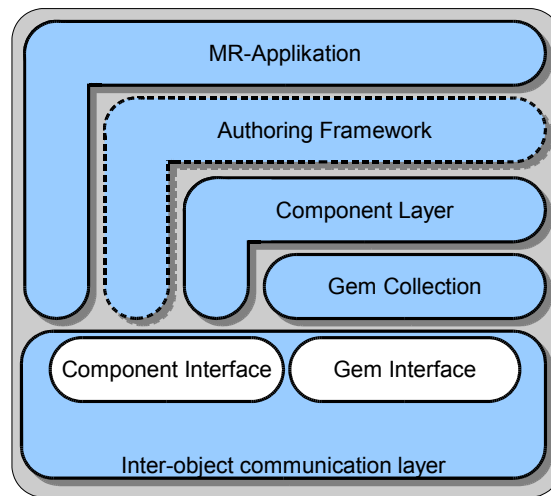


Abbildung 6.4: AMIRE-Architektur [AMI04a]

Einfacheren heraus zu errichten. Es bildet die Grundlage des so genannten Authoring-Framework, das die Autorenumgebung der AMIRE-Architektur bildet, indem es grundlegende Methoden zur Verfügung stellt, um festzustellen, ob Komponenten untereinander verbunden werden können.

Die Architektur des Frameworks ist in verschiedene Ebenen unterteilt, die die Funktionen der Gems und Komponenten zugreifbar machen. Die unterste Ebene, wie es in [Abbildung 6.4](#) dargestellt ist, ermöglicht die Kommunikation zwischen Komponenten und Gems. Deren Kommunikationsschicht bietet eine allgemeine Schnittstelle und Mechanismen für das Komponentenmanagement.

Die darüber liegende Komponentenebene basiert auf der Gem-Kollektion und kann auf die Funktionalität der Gems über die Kommunikationsschnittstelle zugreifen. Das so genannte Authoring-Framework, das die Basis der Autorenumgebung darstellt, setzt auf der Komponentenebene auf und besitzt dabei über Zugriff auf die unteren Ebenen, um Prozesse des AMIRE-Framework steuern zu können. Die Applikationsebene stellt dann die Schnittstellen der MR-Anwendung dar.

6.1.2 AMIRE-Autorenumgebung

Die Autorenumgebung der AMIRE-Architektur basiert auf dem gleichen Framework und stellt somit ein Netzwerk von AMIRE-Komponenten dar, bei dem auch die einzelnen Autorenwerkzeuge in Form von AMIRE-Komponenten realisiert sind. Diese Werkzeuge ermöglichen zum einen das dynamische einbinden von Komponentenbibliotheken in das Framework und die Erstellung von Instanzen der Komponenten aus diesen Bibliotheken, und zum anderen ermöglichen sie die Anpassung der erzeugten Komponenten über die standardisierten Schnittstellen. Die Autorenwerkzeuge besitzen über den Zugriff auf die erstellten Komponenten der MR-Anwendung und ermöglichen somit auch

dem Autor die Erstellung von Kommunikationsverbindungen zwischen den Komponenten. Da die Autorenumgebung auf dem AMIRE-Framework aufbaut, ist die Vorschau auf die erstellte MR-Anwendung während des Erstellungsprozesses möglich. Dabei kann der Autor die Sicht des Endanwenders in der Applikation einnehmen und dessen Verhalten simulieren, um somit schon während der Erstellung, Teile der Anwendung auf deren Funktionalität zu überprüfen.

6.2 Architektur der Implementierung

Grundlage für die Markerkategorisierung, die Wiederverwendung und die redundante Markerkombination, ist die Erweiterung der Standardmarkerkomponente der AMIRE-Umgebung. Die erweiterte Markerkomponente bietet die Funktionalität, die für die Filterung der Trackingangaben, für die Berechnung des Gütwertes der Trackingangaben und für die Aktivierung des Trackingverhaltens bei der Wiederverwendung von Markern, benötigt werden.

Die erweiterte Markerkomponente steht somit in der AMIRE-Architektur gleichberechtigt auf einer Ebene mit der Standardmarkerkomponente. Die Komponente, die das Kategorisierungswerkzeug realisiert, verfügt über den Zugriff auf die erweiterte Markerkomponente, um deren Trackingangaben während der Kategorisierung zu kontrollieren und die Eigenschaften der Markerkomponente nach der Kategorisierung manipulieren zu können.

Die Bereichsmanagementkomponente kontrolliert und realisiert die Markertupel, in dem sie entsprechende Markerkombinationen aus erweiterten Markerkomponenten erzeugt und steuert. Dazu wird das Erkennungsverhalten der Bereichsmarker, die in Form von erweiterten Markerkomponenten realisiert sind, von der Bereichsmanagementkomponente abgegriffen und das Trackingverhalten der entsprechenden Positionsmarker des Bereiches, die auch in Form von erweiterten Markerkomponenten umgesetzt sind, aktiviert oder deaktiviert.

Die redundante Markerkombination ist in Form einer Multimarkerkomponente umgesetzt, die auf die Trackingangaben von einzelnen erweiterten Markerkomponenten zugreift. Dabei kann in einer Markerkombination auch auf die Trackingangaben der erweiterten Markerkomponenten zugegriffen werden, die unter der Kontrolle der Bereichsmanagementkomponente stehen.

Das Zusammenspiel dieser Komponenten wird in [Abbildung 6.5](#) nochmals verdeutlicht. Dabei ist festzustellen, dass bis auf das spezielle Kategorisierungswerkzeug, die Komponenten in der Komponentenschicht der AMIRE-Architektur angesiedelt sind. Das Kategorisierungswerkzeug hingegen ist Teil der AMIRE-Autorenumgebung und bietet keinerlei Funktion zur Laufzeit einer Anwendung.

Alle implementierten Komponenten können in Form einer Bibliothek (DLL Dynamic Link Library), in die AMIRE-Autorenumgebung geladen werden und stehen somit im Komponentenfundus für den Autor zur Verfügung.

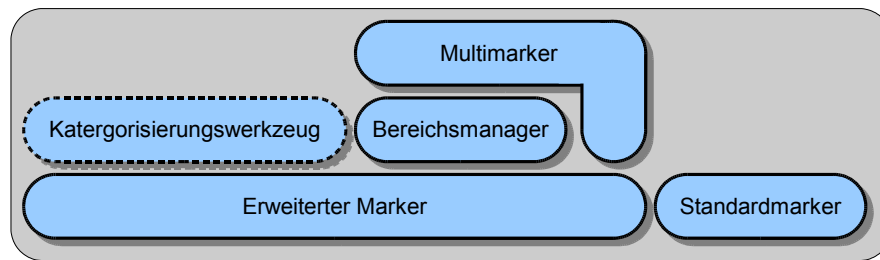


Abbildung 6.5: Architektur der Komponenten

Bis auf die erweiterte Markerkomponente, bieten alle implementierten Komponenten auch graphische Benutzungsschnittstellen, in Form von MFC-Dialogen (Microsoft Foundation Classes) an. Diese Dialoge sind dabei die Kommunikationsschnittstelle zur Authoring-Zeit und werden zur Laufzeit der Anwendung ausgeblendet (siehe [Abbildung 6.6](#)).

In folgenden Abschnitt werden die einzelnen Komponenten betrachtet um einen Einblick in deren Funktionsweise zu geben.

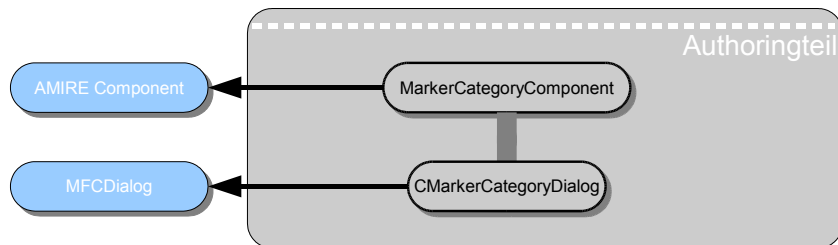
Überführung in AMIRE-Komponenten

Für die Umsetzung der Markerkategorien wurde die schon bestehende Markerkomponente, um die Funktionalität der Filterung der Trackingangaben erweitert. Die Hilfestellung, die bei der Kategorisierung der Marker dem Autor zur Verfügung gestellt werden soll, wird durch das Kategorisierungswerkzeug realisiert, mit dessen Hilfe das Trackingverhalten einer erweiterten Markerkomponente analysiert werden kann, um anschließend die Kategorie des Markers festlegen zu können.

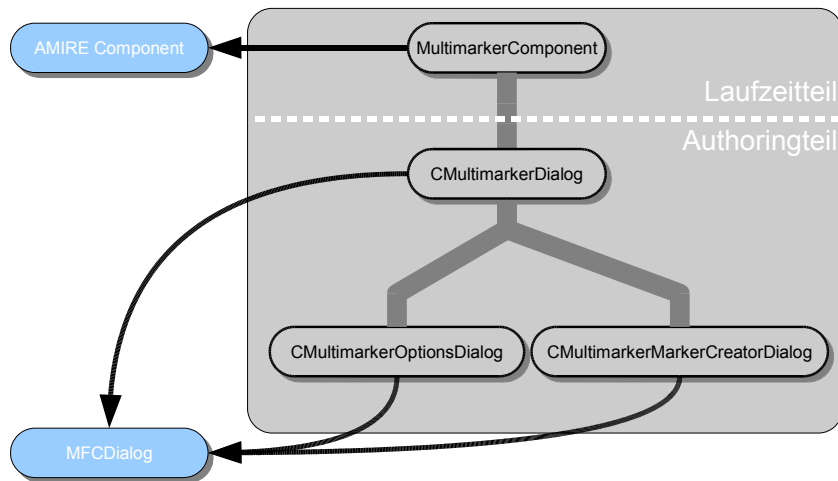
Die Multimarkerkomponente setzt das Konzept der redundanten Markerkombination um. Es kombiniert die Trackingangaben von verschiedenen Markerkomponenten und bietet auch die Hilfestellung bei der Erzeugung einer Kombination für die spezielle Orbiting-Anwendung.

Die Bereichsmanagerkomponente verwaltet die Wiederverwendung von Markern und bietet die Hilfestellung bei der Erweiterung von Bereichen und der Erzeugung von neuen Bereichen. Dabei greift die Bereichsmanagerkomponente auf die erweiterte Markerkomponente zurück, um eine Schnittstelle für die Trackingangaben der Marker in den Bereichen zu bieten.

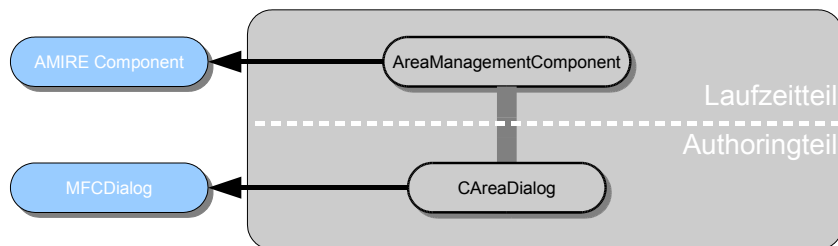
In den folgenden Abschnitten wird auf die Funktionsweise der einzelnen Komponenten eingegangen. Dazu werden die Schnittstellen zu den jeweiligen Komponenten (Out- und In-Slots und die Configuration Properties) aufgezählt und erläutert.



(a) Kategorisierungswerkzeug



(b) Multimarkerkomponente



(c) Bereichsmanagerkomponente

Abbildung 6.6: Klassendiagramme der implementierten Komponenten

6.2.1 Erweiterte Markerkomponente

Die erweiterte Markerkomponente stellt eine Anpassung der Standardmarkerkomponente der AMIRE-Umgebung dar. Dabei ist die erweiterte Markerkomponente mit den Filterungstechniken der Markerkategorien und mit der Funktionalität der Markertupel erweitert worden. Für die Filterungstechniken wurde dazu eine zusätzliche Programmbibliothek eingebunden (Bayes++ Bayesian Filtering Classes Release 2003.8-3 [BAY04]), die insbesondere die benötigten Klassen der Kalman-Filterung beinhalten.

Die Berechnung der Gütewerte, der erzeugten Trackingangaben, wird in der erweiterten Komponente durchgeführt und am Out-Slot `confidenceFactor` (aus Kompatibilitätsgründen wird dieser Name gewählt) zur Verfügung gestellt. Die Komponente bietet trotz dieser Erweiterung noch die ursprüngliche Funktionalität der Standardmarkerkomponente und kann somit die Standardmarkerkomponente beim Tracking einzelner Marker ersetzen.

Im Folgenden werden die Schnittstellen (Configuration Properties, In-Slots und Out-Slots) der erweiterten Markerkomponente betrachtet, um die Funktionalität und Verwendung der Komponente genauer beschreiben zu können.

Configuration Properties

Die Properties `markerWidth`, `markerFile`, `detectedHintFile`, `showPickingBound`, `showDetectedHint`, `pickable` sind dabei von der Standardmarkerkomponente übernommen worden. Mit Hilfe der Properties `markerWidth` und `markerFile` wird der Komponente mitgeteilt von welchem Marker die Trackinginformationen bestimmt werden sollen. Die Properties `detectedHintFile` und `showDetectedHint` definieren das Verhalten der Visualisierung des Erkennungsstatus. Die Properties `pickable` und `showPickingBound` steuern das Picking-Verhalten des Markers und die Visualisierung des Picking-Bereiches.

Eine Erweiterung der Configuration Properties wurde mit den Properties `markerCategory`, `showAccuracyValue`, `enableVisibleInSlot` durchgeführt. Deren Funktionen werden in der folgenden Aufzählung beschrieben:

„markerCategory“ Property: Dieses Property der erweiterten Markerkomponente legt die Kategorie des zu betrachtenden Markers fest. Diese Wahl der Kategorie ändert das Filterungsverhalten der Komponente, wie es im Konzept [Abschnitt 4.1](#) beschrieben wird. Die möglichen Werte, die diese Property annehmen kann, sind in der [Tabelle 6.1](#) aufgelistet, wobei auch die Zuordnung zu den Kriterien Dynamik und Sichtbarkeit des Markers stattfindet.

„showAccuracyValue“ Property: Wie schon erwähnt bestimmt die erweiterte Markerkomponente den Gütewert der erzeugten Trackinginformation und stellt diesen Wert über einen Out-Slot zur Verfügung. Mit Hilfe des `showAccuracyValue` Property kann eine Visualisierung des Wertes aktiviert werden. Dabei wird der Wert an der Position des Markers dargestellt, so dass die Güte der Trackinginformation direkt abgelesen werden kann.

Kriterium der Sichtbarkeit	Kriterium der Dynamik Unbewegt	Gering bewegt	Stark bewegt
Immer sichtbar	"motionless-alwaysVisible"	"gentlyMoved-alwaysVisible"	"heavilyMoved-alwaysVisible"
Teilweise sichtbar	X	"gentlyMoved-temporarilyVisible"	"heavilyMoved-temporarilyVisible"

Tabelle 6.1: Zuordnung der Markerkategorien

„enableVisibleInSlot“ Property: Eine zusätzliche Erweiterung der Markerkomponente ermöglicht, wie schon erwähnt, die Realisierung der Markertupel mit Hilfe der erweiterten Markerkomponente, und somit der Wiederverwendung von Markern. Hierzu muss das Tracking der erweiterten Markerkomponente von der Bereichsmanagementkomponente deaktiviert werden können (genauer dazu in [Unterabschnitt 6.2.4](#)). Dieses Verhalten kann mit dem `enableVisibleInSlot` Property aktiviert werden, wodurch mit Hilfe des `visible` In-Slots der erweiterten Markerkomponente das Tracking kontrolliert werden kann.

In-Slots

Die erweiterte Markerkomponente besitzt einen `visible` und einen `transformation` In-Slot, die von der Klasse `Visible3DComponent` geerbt wurden. Dabei besitzt der `visible` In-Slot die schon erwähnte Funktion, das Trackingverhalten der Komponente zu aktivieren oder zu deaktivieren. Diese spezielle Funktion wird mit dem Configuration Property `enableVisibleInSlot` aktiviert.

Out-Slots

Die Out-Slots der erweiterten Markerkomponente entsprechen den vier Out-Slots der Standardmarkerkomponente. Die Trackingangaben werden am `transformation` Out-Slots zur Verfügung gestellt, dabei geben der `visible` und der `detected` Out-Slot an, ob die Markerererkennung erfolgreich war. Der `confidenceFactor` Out-Slot bietet die Informationen über den Gütewert der Trackingangaben.

6.2.2 Kategorisierungswerkzeug

Die Hilfestellung die dem Autor bei der Kategorisierung der Marker zur Verfügung gestellt werden soll, wird mit Hilfe des Kategorisierungswerkzeuges ermöglicht. Dieses Werkzeug ist in Form einer AMIRE-Komponente realisiert, die sich interaktiv mit der zu kategorisierenden Markerkomponente verbindet und nach der Bestimmung der Kategorie, die entsprechenden Configuration Properties der Markerkomponente manipuliert. Das Kategorisierungswerkzeug ist dabei eine Komponente deren Funktionalität ausschließlich in der Autorenumgebung angeboten wird. Innerhalb der Laufzeitumgebung des AMIRE-Framework tritt diese Komponente in den Hintergrund.

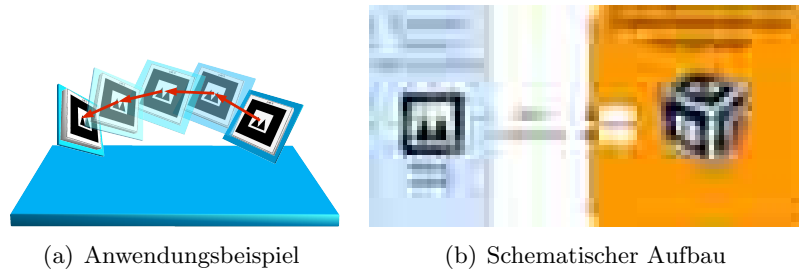


Abbildung 6.7: Anwendungsbeispiel des Markerkategorisierungswerkzeug

Im Folgenden werden die Schnittstellen (Configuration Properties und In-Slots) des Kategorisierungswerkzeuges betrachtet, um die Funktionalität und Verwendung der Komponente genauer beschreiben zu können.

Configuration Properties

Die Markerkategorisierungskomponente besitzt ein Property das den Namen `scanTime` trägt. Mit Hilfe dieses Property kann die Überprüfungsdauer des zu kategorisierenden Markers bestimmt werden.

In-Slots

Mit Hilfe des Kategorisierungswerkzeuges kann die Kategorie eines Markers bestimmt und festgelegt werden. Die zu kategorisierende erweiterte Markerkomponente wird dazu dynamisch nach der Auswahl des Autors mit der Kategorisierungskomponente verbunden. Dies geschieht über die `visible` und `transformation` In-Slots der Komponente. Über diese Slots erhält somit die Komponente die Trackingangaben des zu kategorisierenden Markers. [Abbildung 6.7](#) zeigt die Slot-Verbindungen zur erweiterten Markerkomponente, die bei der Kategorisierung erstellt werden.

6.2.3 Multimarkerkomponente

Die redundante Markerkombination ist in Form der Multimarkerkomponente realisiert, die die Trackinginformationen verschiedener Markerkomponenten verarbeitet und die kombinierten Trackinginformation an den Out-Slots der Komponente anbietet. Die Multimarkerkomponente verbindet sich innerhalb der Autorenumgebung dabei interaktiv mit den Markern der Kombination, um deren Trackingangaben abgreifen zu können. Innerhalb der Autorenumgebung bietet diese Komponente auch die spezielle Orbiting Hilfestellung, die über das Dialogfenster der Komponente gestartet werden kann. In der Laufzeitumgebung beschränkt sich die Funktionalität der Multimarkerkomponente auf die automatisierte Berechnung der kombinierten Trackingangaben, die an ihren Out-Slots zur Verfügung stehen.

Im Folgenden werden die Schnittstellen (Configuration Properties, In-Slots und Out-Slots) der Multimarkerkomponente betrachtet, um die Funktionalität und Verwendung der Komponente genauer beschreiben zu können.

Configuration Properties

Die Multimarkerkomponente besitzt einige Properties, die auch in der erweiterten Markerkomponente genutzt werden. Dabei handelt es sich um die `showPickingBound` und `pickable` Properties, die wie bei der erweiterten Markerkomponente die Funktionalität des Pickings steuern. Das `detectedHintFile` Property und das `showDetectedHint` Property steuern die Visualisierung des Erkennungsverhaltens der Multimarkerkomponente.

Die für das spezielle Verhalten der Multimarkerkomponente zuständigen Properties werden in der folgenden Aufzählung ausführlicher beschrieben.

„doAverage“ Property: Die Multimarkerkomponente besitzt zwei unterschiedliche Modi in denen die Trackingangaben der einzelnen Marker der Kombination unterschiedlich behandelt werden. In einem Modus wird die Trackingangabe mit dem größten Gütewert ausgewählt, um die Trackinginformationen der Markerkombination zu erzeugen. In dem anderen Modus werden alle zur Verfügung stehenden Trackingangaben der einzelnen Marker vereinigt, wobei die Trackingangaben mit deren Gütewert gewichtet werden. Die Auswahl des Modus geschieht mit Hilfe des `doAverage` Property, wobei bei der Aktivierung des booleschen Property die Vereinigung mit Gewichtung durchgeführt wird. Bei Deaktivierung des Property findet die Selektion der Trackinginformation statt.

„showOffsetVisualization“ Property: Der Erkennungsstatus der einzelnen Marker und deren Offset zum einheitlichen Koordinatensystem der Markerkombination wird durch die Aktivierung des booleschen Property `showOffsetVisualization` visualisiert. Die erkannten Marker werden gekennzeichnet und deren Offset mit Hilfe einer Linie verdeutlicht. Bei aktiviertem Auswahlmodus (der durch das `doAverage` Property bestimmt wird) wird der Offset des Markers hervorgehoben, der die Trackinginformationen der Markerkombination bestimmt.

„averageCount“ Property: Eine weitere Funktionalität der Multimarkerkomponente ist das interaktive Erweitern der Kombination, die durch das Auswählen eines Markers im Videobild ausgelöst wird. Dazu wird die hinzuzufügende Markerkomponente mit der Multimarkerkomponente verbunden, um deren Trackingangaben abgreifen zu können und um anhand dieser Angaben den Offset zwischen dem Koordinatensystem des einzufügenden Markers und des einheitlichen Koordinatensystems der Markerkombination zu bestimmen. Diese Offsetbestimmung kann über einen festgelegten Zeitraum durchgeführt werden, der durch das Property `averageCount` definiert wird (das Property definiert dabei das Zeitintervall über eine Frameanzahl). Die einzelnen Offsetwerte, werden dann über den Zeitraum gemittelt.

„offsetScanCount“ Property: Die Offsetbestimmung für die Marker der Kombination kann auch interaktiv durchgeführt werden. Dazu werden alle Offsetberechnungen für alle Marker der Kombination erneut durchgeführt. Das Property `offsetScanCount` legt dabei fest, wie viele Offsetwerte für jeden Marker bestimmt werden sollen.

Die Properties `offsetScanCount`, `averageCount`, `showOffsetVisualization` und `doAverage` werden von der Multimarkerkomponente selbstständig verwaltet und können mit dem integrierten Optionsdialog angepasst werden.

„markers“ Property: Die Multimarkerkomponente verwaltet alle eingefügten Marker und deren Eigenschaften, wie Komponentennamen, oder Icon der Komponente. Das `markers` Property speichert diese Werte und besitzt dafür ein spezielles Vektorformat. Ein Eintrag des Vektors besitzt folgende Form:

- `iconFileName` definiert das Icon, das zur Darstellung der Markerkomponente genutzt wird.
- `componentName` legt den angezeigten Namen der Markerkomponente fest.
- `transformationSlotName` speichert die Angaben, mit welchem `transformation` In-Slot der Marker verbunden ist.
- `activateSlotName` speichert die Angaben, mit welchem `activate` In-Slot der Marker verbunden ist.
- `confidenceSlotName` speichert die Angaben, mit welchem `confidence` In-Slot der Marker verbunden ist.
- `offset` speichert den Offset des Markers, der zur Transformation in das einheitlichen Koordinatensystem der Markerkombination verwendet wird.

In-Slots

Die In-Slots der Multimarkerkomponente werden dynamisch angepasst. Das bedeutet, dass die Anzahl der In-Slots mit der Anzahl der Marker in der Kombination wächst. Jeder Marker der Kombination wird dabei mit drei In-Slots der Multimarkerkomponente verbunden. Der erste Slot ist dabei der `activate` In-Slot, der mit dem `visible` Out-Slot der Markerkomponente verbunden wird und somit Angaben über den Erkennungsstatus des Markers gibt. Der zweite ist der `transformation` In-Slot der mit dem `transformation` Out-Slot der Markerkomponente verbunden wird und somit auf die eigentlichen Trackingangaben zugreift. Als drittes wird der `confidence` mit dem `confidenceFactor` Out-Slot der Markerkomponente verknüpft und gibt somit Informationen über den Gütewert der einzelnen Trackingangaben.

Out-Slots

Die Out-Slots der Multimarkerkomponente sind den vier Out-Slots der Standardmarkerkomponente nachgebildet. Die aus den einzelnen Markern kombinierten Trackingan-

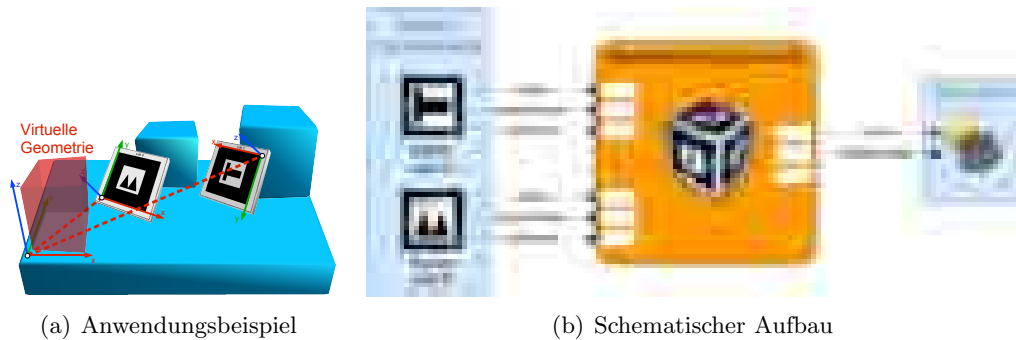


Abbildung 6.8: Anwendungsbeispiel der Multimarkerkomponente

gaben werden am **transformation** Out-Slot zur Verfügung gestellt, dabei geben, wie bei der Standardmarkerkomponente, der **visible** und der **detected** Out-Slot an, ob das Tracking mit Hilfe der einzelnen Marker erfolgreich war. Die Multimarkerkomponente bietet mit dem **confidenceFactor** Out-Slot ebenfalls die Informationen über den Gütewert der Trackingangaben. [Abbildung 6.8](#) zeigt die Slot-Verbindungen in einem kleinen Anwendungsbeispiel, bei dem eine Geometrie mit Hilfe der Multimarkerkomponente, die zwei Marker kombiniert, dargestellt wird.

6.2.4 Bereichsmanager Komponente

Die Erstellung und Verwaltung von Markertupeln zur Wiederverwendung von Markern wird durch die Bereichsmanagementkomponente umgesetzt. In der Autorenumgebung und zur Laufzeit verwaltet diese Komponente alle zur Verfügung stehenden Marker und bietet speziell in der Autorenumgebung die Funktionen zur Erstellung neuer Bereiche und zur Erweiterung bestehender Bereiche. Dabei werden von der Bereichsmanagementkomponente dynamisch neue Markertupel erstellt, und zwar in Form von erweiterten Markerkomponenten, die dann auch in der Laufzeitumgebung von der Bereichsmanagementkomponente kontrolliert werden.

Im Folgenden werden die Schnittstellen (Configuration Properties, In-Slots und Out-Slots) der Bereichsmanagementkomponente, der Funktionalität und Verwendung, genauer beschrieben.

Configuration Properties

Eine Aufgabe der Bereichsmanagementkomponente ist die Verwaltung der Marker, die dem Autor zur Verfügung gestellt werden. Die Speicherung dieser Angaben findet mit Hilfe der Properties **allMarkers**, **positionMarkers** und **areaMarkerConnections** statt, auf deren Struktur und Funktion im Folgenden eingegangen wird.

„allMarkers“ Property: Um die Erstellung und Erweiterung von Bereichen und deren Markern zu ermöglichen, werden alle zur Verfügung stehenden Marker des Systems

von der Bereichsmanagementkomponente verwaltet. Hierzu dient das Property `allMarkers`. Das Property stellt somit den Fundus an Markern dar, mit dem die Komponente arbeiten wird. Das Property selbst besitzt eine Vektorstruktur, wobei jeder Vektoreintrag die Informationen eines zum Fundus gehörendem Markers trägt. Solch ein Vektoreintrag besitzt folgende Form:

- `iconFileName` speichert die Information, mit welchem Icon die Markerkomponente dargestellt wird.
- `markerFileName` speichert die Angabe, in welcher Datei die Informationen zum Markermuster abgelegt sind.
- `componentName` repräsentiert den darzustellenden Namen der Markerkomponente.

„positionMarkers“ Property: Eine weitere Aufgabe der Bereichsmanagementkomponente besteht in der interaktiven Erweiterung von Markern in den verschiedenen Bereichen. Dazu müssen die Eigenschaften von bereits erstellten Markern eines Bereiches verwaltet werden, um keine gleichen Positionsmarker in einem Bereich zu verwenden. Dies wäre ein Verstoß gegen die in [Abschnitt 4.4](#) festgelegten Integritätsregeln. Die Eigenschaften der erstellten Positionsmarker werden im Property `positionMarkers` abgelegt, das eine Vektorenstruktur aufweist. Ein Eintrag steht wiederum für einen erzeugten Marker und besitzt die folgende Form:

- `iconFileName` speichert die Information, mit welchem Icon die Positionsmarker dargestellt wird.
- `markerFileName` speichert die Angabe, in welcher Datei die Informationen zum Markermuster des Positionsmarkers abgelegt sind.
- `componentName` repräsentiert den darzustellenden Namen des Positionsmarkers.

„areaMarkerConnections“ Property: Hauptaufgabe der Bereichsmanagementkomponente ist die Verwaltung der Markertupel, die zum einen aus einem Bereichsmarker und zum anderen aus einem Positionsmarker bestehen. Die Bereichsmarker sind dabei mit den In-Slots der Komponente verbunden, um deren Aktivierung feststellen zu können, und die Positionsmarker sind mit den Out-Slots der Komponente verbunden, um deren Trackingverhalten steuern zu können. Die Tupelinformationen, d.h. welcher Bereichsmarker gehört zu welchem Positionsmarker, werden mit dem Property `areaMarkerConnections` festgelegt. Dies ist ebenfalls ein Vektor, dessen Einträge jeweils einen Bereichsmarker repräsentieren. Die Form eines solchen Eintrages ist wie folgt festgelegt:

- `areaConnections` ist wiederum ein Vektor, der die Zuordnung der Positionsmarker des Bereichsmarkers übernimmt. Jeder Eintrag in diesem Vektor entspricht einem Markertupel.

- **iconFileName** speichert die Information, mit welchem Icon der Bereichsmarker dargestellt wird.
- **markerFileName** speichert die Angaben, in welcher Datei die Informationen zum Markermuster des Bereichsmarkers abgelegt sind.
- **areaName** repräsentiert den Namen des Bereiches, der auch innerhalb der Autorenumgebung angezeigt wird, wenn der Bereich aktiviert ist.

In-Slots

Da die Bereiche und somit auch die Bereichsmarker dynamisch erzeugt werden können, müssen die In-Slots der Bereichsmanagementkomponente, wie bei der Multimarkerkomponente, dynamisch erweiterbar sein. Jeder **visible** Out-Slot eines Bereichsmarkers wird dabei mit dem jeweiligen **activate** In-Slot der Bereichsmanagementkomponente verbunden. Mit Hilfe dieses In-Slots kann somit festgestellt werden, welcher der Bereichsmarker erkannt wurde und somit welcher der Bereiche aktiviert werden soll.

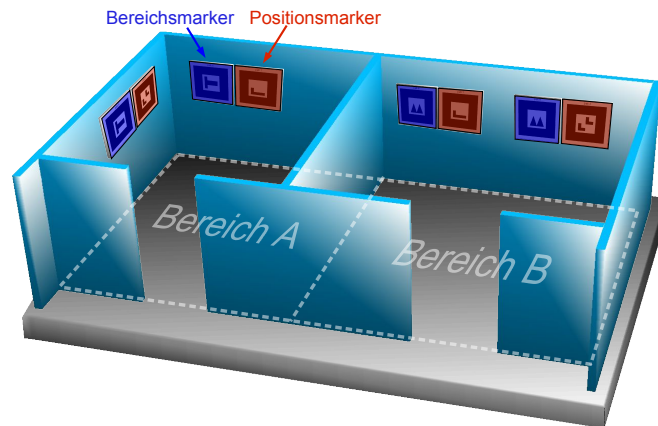
Out-Slots

Die Out-Slots der Bereichsmanagementkomponente sind ebenfalls dynamisch anpassbar. Jeder einzelne Positionsmarker wird mit Hilfe eines **activate** Out-Slots aktiviert oder deaktiviert, in Abhängigkeit von dem aktivierten Bereich. [Abbildung 6.9](#) zeigt die Slot-Verbindungen in einem kleinen Anwendungsbeispiel.

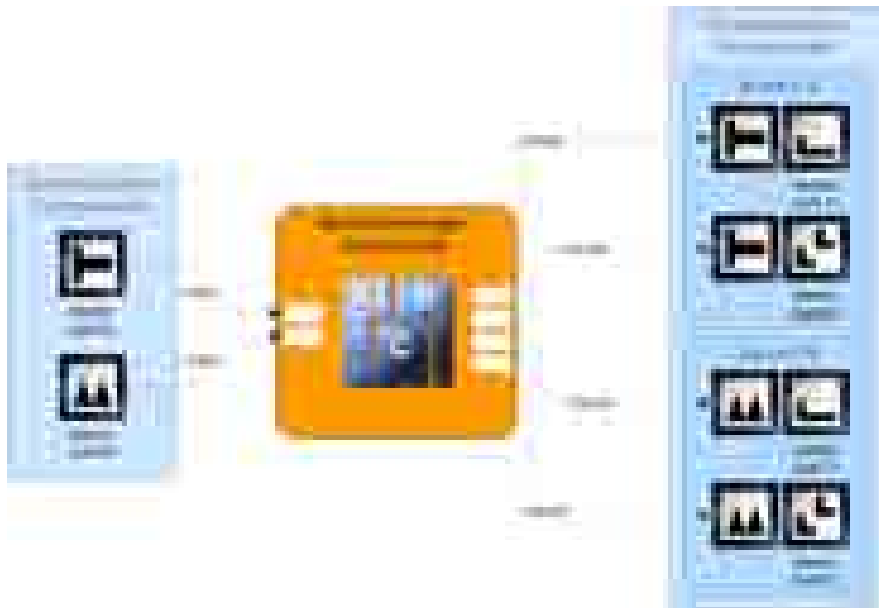
6.3 Probleme und Limitationen

Die Limitation der maximalen Anzahl von verwendbaren Markern des ARToolKit-Trackingsystems, wird anscheinend von der AMIRE-Autorenumgebung ignoriert. Die AMIRE-Autorenumgebung und das zu Grunde liegende Framework ermöglichen die Verwendung einer unbeschränkten Anzahl von Markern, die allerdings bei Überschreitung der Obergrenze, offensichtlich wahllos Trackinginformationen zugeordnet bekommen. Dieses Verhalten kann durch die erstellten Werkzeuge nur bedingt kontrolliert werden, indem versucht wird, die Anzahl von verwendeten Markern beschränkt zu halten. Allerdings besitzen die Werkzeuge keinen Zugriff auf die im kompletten System verwendeten Marker, so dass dadurch das Problem nicht beseitigt werden kann.

Die Wahl des Trackingsystems in Form von ARToolKit ermöglicht die Verwendung von beliebigen Markermustern, die auch zur Laufzeit der Autorenumgebung dynamisch verändert werden können. Dieser Vorteil der dynamischen Anpassungsfähigkeit, birgt das Problem des Kontrollverlusts über alle verwendeten Marker des Trackingsystems in sich. Bei der Erstellung des Markerfundus, der für die Wiederverwendung von Markern benötigt wird, führt dies zu Problemen, da das entsprechende Werkzeug, keinerlei Informationen über die verwendeten Marker oder über Erweiterungen durch Marker



(a) Anwendungsbeispiel



(b) Schematischer Aufbau

Abbildung 6.9: Anwendungsbeispiel des Bereichsmanagers

bekommt. Der Autor wird dazu angewiesen den Fundus an Markern selbstständig festzulegen. Die Funktion der automatisierten Bestimmung des Fundus, betrachtet dazu nur spezielle Komponenten, von denen bekannt ist, dass sie die Trackinginformationen von Markern anbieten. Eine Weiterentwicklung dieser Komponenten könnte zu Inkompatibilitäten führen, die eine Fundusbestimmung, ohne eine Anpassung des Werkzeuges, unmöglich macht.

Ein generelles Problem der AMIRE-Autorenumgebung liegt in der Tatsache verborgen, dass die implementierten Werkzeuge in der Autorenumgebung auch übliche AMIRE-Komponenten darstellen, auf die auch mit den Werkzeugen der Autorenumgebung zugegriffen werden kann. Es gibt dabei keine Restriktionen, die es dem Autor verbietet, beispielsweise Slot-Verbindungen aufzuheben, die von einem Werkzeuge dynamisch erstellt worden sind. Solche Verbindungen benötigt beispielsweise die Multimarkerkomponente, um die Trackinginformationen von erweiterten Markerkomponenten abgreifen zu können. Werden solche Verbindungen vom Autor gekappt, erlangt die Multimarkerkomponente keine Informationen darüber und wird voraussichtlich mit Fehlfunktionen weiterarbeiten.

Eine weitere Beschränkung, die durch das AMIRE-Framework gegeben ist, liegt in der fehlenden Unterscheidbarkeit der Laufzeitumgebung von der Autorenumgebung. Die implementierten Komponenten und Werkzeuge bieten prinzipiell die Funktionalität, den Authoringteil zur Laufzeit abstellen zu können. Allerdings kann von einer Komponente aus nicht festgestellt werden, in welchem Modus sich das Framework gerade befindet. Somit ist es möglich, dass zur Laufzeit einer Anwendung, Authoring-Informationen angezeigt werden, die an dieser Stelle nicht erwünscht sind. In der Implementierung wurde dieses Problem dahingehend behoben, dass die Komponenten, die solche Informationen in der Autorenumgebung bieten können, das komplette Komponentennetzwerk nach speziellen Autorenkomponenten durchsuchen und gegebenenfalls die Funktionalität selbstständig abstellen.

Kapitel 7

Evaluierung

Im Kapitel der Evaluierung wird eine kritische Betrachtung der Arbeit durchgeführt. Dazu wird im ersten Schritt die Vorgehensweise hinterfragt, um feststellen zu können, inwieweit mit dem gewählten Vorgehen das Ziel der Arbeit erreicht werden konnte. Im zweiten Schritt werden die Ergebnisse der Arbeit betrachtet und mit der Zielsetzung verglichen.

7.1 Vorgehensweise

Einstiegspunkt der Arbeit war die Literaturrecherche. Dazu wurden wissenschaftliche Veröffentlichungen zur Hilfe genommen, die in den Online-Bibliotheken ACM¹ und IEEE² zur Verfügung standen. Außerdem wurde die zur Verfügung stehende Literatur aus der Institutsbibliothek und der Universitätsbibliothek genutzt. Speziell für die Untersuchung aktueller MR-Projekte wurde das Internet herangezogen, da entsprechende Webseiten für die Projekte erstellt wurden, die auch auf weiterführende Informationen verweisen. Die verwendeten Quellen sind sicherlich nicht vollständig, allerdings standen durch die wissenschaftlichen Veröffentlichungen, zahlreiche aktuelle Ergebnisse zur Verfügung, die dann zusammen mit der Buchauswahl, einen breiten Spektrum abdeckten. Problematisch war allerdings dabei die Recherche im Bereich der MR-Grundlagen, da diese Informationen speziell in den wissenschaftlichen Veröffentlichungen vorausgesetzt werden und für die Institutsbibliothek offensichtlich schon zu speziell sind. Standardwerke standen in diesem Bereich nicht zur Verfügung.

Die Aneignung der Grundlagen aus dem MR-Bereich war notwendig, um sich in die spezielle Thematik dieser Arbeit, dem Tracking und der Autorenunterstützung, einzuarbeiten zu können. Die Recherche in diesem Bereich war dabei nicht zu unterschätzen, da soweit wie möglich sichergestellt werden sollte, dass es für die betrachteten Themengebiete, nicht schon vollständige Lösungen existieren. Gleichzeitig ist es durch die Recherche ermöglicht worden auf bestehende Lösungsansätze in bestimmten Teilgebieten, wie der Filterung zurückzugreifen. Um den Rechercheaufwand trotzdem so gering wie möglich zu halten, wurde auch auf bestehende Vergleichsstudien, wie im Bereich

¹ Association for Computing Machinery <http://www.acm.org/dl>

² Institute of Electrical and Electronics Engineers <http://www.ieee.org/>

der Autorensysteme, zurückgegriffen. Diese Veröffentlichungen bestätigten die Wahl des AMIRE-Autorensystems, das zur Implementierung der entwickelten Konzepte herangezogen wurde.

Die Recherche ermöglichte auch die Bewertung der verschiedenen Trackingtechnologien, die in MR-Anwendungen zum Einsatz kommen können. Die hervorgehobenen Kriterien dieser Bewertung ergaben sich mitunter aus der Aufgabenstellung, die insbesondere auf eine einfache Anwendbarkeit für den Autor einer MR-Applikation verweist.

Die Analyse der Trackingtechnologie zeigte allerdings auch, dass alle vorgestellten Verfahren, auch Nachteile und Beschränkungen besitzen. Diese Beschränkungen mussten auch für die ausgewählte Technologie des markerbasierten Tracking, untersucht werden. Dazu wurden verschiedenen Anwendungsfälle betrachtet, die zum einen die Anwendbarkeit der Trackingtechnologie zeigen sollten, und zum anderen aber auch auf die Problembereiche des markerbasierten Tracking hinweisen. An dieser Stelle müsste überprüft werden, ob die gewählten Anwendungsfälle auch die Großzahl der MR-Anwendungen, in Bezug auf das Tracking, abdecken.

Die gewählten Anwendungsfälle deuteten auf Probleme im Bereich der Verdeckung von Markern, der Probleme durch Erkennungsschwankungen und der Probleme, die durch die Beschränkung der Markeranzahl gegeben sind, hin. Zu diesen Problembereichen wurde allerdings auch auf prinzipielle Lösungsansätze verwiesen, die im Bereich der Kombination von Markern, der Filterung von Trackingangaben und der Wiederverwendung von Markern liegen. Diese Lösungsansätze wurden daraufhin eingehender betrachtet, um die Grundlagen für die darauf folgende Konzeptentwicklung zu schaffen.

Dieser Recherche- und Analyseteil nahm einen großen Teil der Zeit in Anspruch, war allerdings in dieser Form notwendig, um bereits bestehende Ansätze zu finden und auch in die Arbeit einfließen lassen zu können. Eine zusätzliche Erweiterung der Recherche hätte eventuell noch weitere Lösungsansätze hervorgebracht, allerdings hätte dies dann auch folgen für die Umsetzung der entwickelten Konzepte gehabt. Ziel der Arbeit ist es schließlich, die theoretischen Erkenntnisse in die Praxis umzusetzen.

Die spezielle Umsetzung der entwickelten Konzepte, innerhalb der AMIRE-Autoren-umgebung, verlangte auch eine Einarbeitungszeit. Die dann implementierten Komponenten mussten auf Fehler und Funktionalität hin getestet werden. Auch dieser Teil der Arbeit ist nicht zu unterschätzen und kann nur mit dem entsprechenden Zeitaufwand zu vorzeigbaren Ergebnissen führen.

Trotz der schwierigen Aufgabe, die Bereiche der Recherche, Analyse, Konzeption und Realisierung zeitlich gut zu gewichten, ist es gelungen wichtige Problembereiche zu erkennen, bestehende Lösungsansätze zu bestimmen und daraufhin eigene Konzepte zu entwickeln, die dann auch vollständig umgesetzt werden konnten.

7.2 Ergebnisse

Das Ziel dieser Arbeit lag in die Entwicklung und Umsetzung von Konzepten die es einem Personenkreis, der über lediglich geringe Kenntnisse von MR-Technologien und deren Anwendung verfügen, eine Hilfestellung bereit zu stellen, die ihnen den kostengünstigen und flexiblen Einsatz von markerbasierten Trackingtechnologien ermöglichen. Auch die problematischen Anwendungsfälle des markerbasierten Trackings, sollen mit dieser Hilfestellung, durch den Autor bewältigt werden können.

Im Laufe der Arbeit wurden auf Grund der durchgeführten Analyse, Konzepte entwickelt, die sich den identifizierten Problembereichen des markerbasierten Tracking widmen. Die Verdeckung von Markern, die schwankenden Positions- und Orientierungsangaben durch das Tracking von Markern, und die Beschränkung der Anzahl maximal verwendbarer Marker in einer Anwendung, wurden dabei als Problembereiche erkannt.

Das Konzept der Markerkategorien ermöglicht dabei den Einsatz von angepassten Filterungsverfahren, die in Abhängigkeit von der Kategorie eingesetzt werden, die schwankenden Positions- und Orientierungsangaben beim Tracking der Marker eliminieren und auch eine Extrapolierung der Trackingangaben ermöglichen. Der Autor ist damit in der Lage, Filterungstechniken zum Einsatz zu bringen, ohne genauere Kenntnisse über deren Funktionsweise besitzen zu müssen. Seine Aufgabe besteht lediglich darin, die Zuordnung der passenden Kategorie durchzuführen, wozu ihm auch ein Werkzeug zur Verfügung gestellt wird, das ihm eine Zuordnung nahezu automatisiert abnimmt. Eine wesentlich vereinfachte Anwendung von Filterungstechniken, aus Sicht des Autors, ist damit sicherlich gegeben. Problem dabei ist allerdings die Wahl der angepassten Filterungsverfahren, der jeweiligen Kategorien und die automatisiert Bestimmung der Kategorie. Die Kategorien, die sich auf die Dynamik und das Erkennungsverhalten des Markers beziehen, waren dabei eine naheliegende Wahl, allerdings sicherlich nicht die optimale. Es bedarf dazu wahrscheinlich an zeitaufwendige Tests, um angepasste Kategorien zu entwickeln und eine ausführlichere Betrachtung und Analyse der verschiedensten Filterungsverfahren. Außerdem müssen auch Kriterien entwickelt werden, die eine automatisierte Zuordnung ermöglichen. Diese Verfeinerung der Kategorien würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, könnte allerdings an anderer Stelle durchgeführt werden, um das entwickelte Konzept zu optimieren. Das verwendete Filterklassenpaket würde dafür einen Einstieg in die Anpassung der einzelnen verwendeten Filter darstellen.

Das Konzept der redundanten Markerkombination ermöglicht dem Autor die Behebung von Verdeckungsproblemen, durch das kombinieren von Trackingangaben unterschiedlicher Marker. Durch den Ansatz der gewichteten Mittelung der Trackingangaben werden dadurch auch schwankende Positions- und Orientierungsangaben von den einzelnen Trackinginformationen der Marker abgeschwächt. Das Konzept der Gütefunktion wurde daraufhin entwickelt, um die Qualität der Trackingangaben vergleichen zu können. Die Parameter der Gütefunktion beschränkten sich dabei auf den Abstand des

Markers zur Kamera und des Kamerawinkels (siehe [Abbildung 5.4\(b\)](#)). Diese Parameter sind leicht berechenbar und weisen auch auf Abhängigkeiten in der Qualität hin. Allerdings wären an dieser Stelle sicherlich noch weitere Parameter denkbar, wie beispielsweise die vollständige Orientierungsangabe, oder auch die Abhängigkeit von den Markermustern, die noch ausführlichere Messungen zur Folge hätten. Auch dieses ist aus zeitlichen Gründen innerhalb der Arbeit nicht durchführbar gewesen. Trotz dieser Unvollkommenheit der Gütefunktion, zeigt das erreichte Ergebnis eine durchaus akzeptable Funktionalität. Die automatisierte Kombination der Trackinginformationen wird erreicht, wobei durch weitere Tests die Verbesserung der Trackingangaben nachgewiesen werden müsste.

Die Funktionalität, die dem Autor die Erweiterung der Markerkombination und die Anpassung der Kombination ermöglicht, ist davon nur indirekt betroffen. Dabei ist eine generelle Anwendbarkeit von Markerkombinationen sicherlich erreicht worden. Die Benutzungsschnittstellen, sind den Gegebenheiten der AMIRE-Autorenumgebung angepasst worden, um eine einheitliche Funktionsweise zu ermöglichen. Inwieweit diese Bedienbarkeit auch für den Autor zugänglich ist, müssten umfangreiche Usabilitytests feststellen. Die Voraussetzungen für solche Tests, sind dafür geschaffen worden, da die implementierten Komponenten problemlos in die AMIRE-Autorenumgebung eingebunden werden können (was durch das Laden der erstellten Laufzeitbibliotheken ermöglicht wird). Für die Bestimmung eines geeigneten Formats dieser Tests, müssten allerdings noch entsprechende Überlegungen durchgeführt werden.

Das gleiche gilt für die Wiederverwendung von Markern durch Markertupel. Die Implementierung konnte nicht im Rahmen eines umfangreichen Usabilitytests, auf dessen Anwendbarkeit überprüft werden. Die Funktionalität des interaktiven Anforderns von neuen Bereichs- und Positionsmarkern in virtuellen Arealen, ermöglicht allerdings einen einfachen Einsatz der Markertupel, wobei im Hintergrund die erforderliche Verwaltung der Tupel stattfindet. Die Integritätsregeln für die Bereichs- und Positionsmarker werden dabei eingehalten, wodurch eine Fehlbedienung an dieser Stelle, dem Autor versagt bleibt. Die Aufteilung in separate Bereiche bleibt allerdings dem Autor selbst überlassen. Dabei können Fehler entstehen, wenn die Bereiche nicht strikt getrennt sind. Die implementierte Komponente kommt in Schwierigkeiten, wenn zu einem Zeitpunkt mehr als ein Bereichsmarker erkannt wird, da anhand dieser Marker die Zuordnung der Positionsmarker stattfindet. Es wird in solchen Situationen zwar ein Warnhinweis angezeigt, doch muss der Autor selbstständig die Fehler korrigieren.

Die Trackingangaben der Markertupel hingegen, können vom Autor wie gängige Trackingangaben (wie Angaben von einzelnen Markern) weiterverwendet werden. Die Markertupel können somit auch in Markerkombinationen eingesetzt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Zielsetzung der Arbeit durch die entwickelten Konzepte erreicht wurde. In der Implementierung wurden diese Konzepte weit über den Prototypenstatus hinaus umgesetzt und haben ihre Einsatzfähigkeit in verschiedenen Anwendungen bewiesen.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit bestand in die Entwicklung und Umsetzung von Konzepten, die es einem Personenkreis, der über lediglich geringe Kenntnisse von MR-Technologien und deren Anwendung verfügen, eine Hilfestellung anzubieten, die ihnen den kostengünstigen und flexiblen Einsatz von markerbasierten Trackingtechnologien ermöglichen. Auch die problematischen Anwendungsfälle des markerbasierten Trackings, sollen mit dieser Hilfestellung, durch den Autor bewältigt werden können.

Um dieses Ziel zu erreichen wurden zunächst verschiedene Trackingtechnologien betrachtet und deren Vor- und Nachteile diskutiert. Es wurden auf Grund dieser Betrachtung, Kriterien für die Bewertung dieser Technologien entwickelt, woraufhin die Wahl des markerbasierten Tracking bestärkt wurde, die sich besonders durch den kostengünstigen, einfachen und flexiblen Einsatz auszeichnet. Daraufhin wurden anhand verschiedener Anwendungsfälle von MR-Applikationen, zum einen die Anwendbarkeit dieser Trackingtechnologie unterstrichen, und zum anderen aber auch auf die Problembereiche des markerbasierten Tracking hingewiesen, wobei diese Problembereiche auf Lösungsansätze hin untersucht wurden. Diese Lösungsansätze konzentrierten sich dabei auf die Wiederverwendung von Markern, Filterung von Trackingangaben und Kombination von Markern.

Neben der Analyse von Trackingtechnologien wurden Konzepte von Autorensystemen und Autorenwerkzeugen betrachtet, um die Anforderungen an Autorenwerkzeuge bestimmen zu können. Dabei wurden die Vorteile eines strukturierten Autorenprozesses und die Vorteile der komponentenbasierten Softwareentwicklung hervorgehoben. Bestehende MR-Systeme wurden daraufhin nach diesen Kriterien untersucht, wobei sich die AMIRE-Autorenumgebung bei dieser Betrachtung von den anderen Systemen abhob und aus diesem Grund für die spätere Implementierung der zu entwickelnden Konzepte ausgewählt.

Die AMIRE-Autorenumgebung wurde dahingehend untersucht, inwieweit dabei die Autorenunterstützung in den zuvor als problematisch erkannten Bereichen des markerbasierten Tracking, berücksichtigt wurde. Die dabei nicht vorhandenen oder unzureichenden Umsetzungen in der Autorenunterstützung, im Bereich der Kombination von Markern, Filterung von Trackingangaben und Wiederverwendung von Markern, waren

dabei Ausgangspunkt für die Entwicklung der Konzepte, in Form der Markerkategorien, der redundanten Markerkombination und der Markertupel.

Das Konzept der Markerkategorien ermöglicht dabei den einfachen Einsatz von angepassten Filterungstechniken beim Tracking von Markern. Dazu werden Marker zu einer Kategorie zusammengefasst, wenn deren zur Filterung entscheidenden Eigenschaften gleich sind. Dem Autor wird dabei die Wahl der Filtertechnik abgenommen und auch die Anwendung der Filterung. Die Aufgabe des Autors besteht lediglich darin, die Marker in die Kategorien einzuordnen, wobei auch dabei eine Hilfestellung angeboten wird.

Das Konzept der redundanten Markerkombinationen ermöglicht den Einsatz von markerbasiertem Tracking auch in Bereichen, in denen die Verdeckung von Markern ein Problem bereitet. Durch das Vereinen der Trackingangaben mehrerer Marker, in einer Markerkombination, können auch die Schwankungen der einzelnen Trackingangaben verringert werden. Das Konzept der Gütefunktion bietet dazu eine Möglichkeit die Trackingangaben qualitativ vergleichen zu können. Durch diese Vergleichsmöglichkeit wird eine automatisierte Auswahl von Markern in einer Kombination realisierbar, bei der die Qualität der Trackingangaben als Maß dient. Dem Autor wird somit eine automatisierte Kombination von Trackingangaben geboten, die mit Hilfe von interaktiven Methoden eine Erweiterung und Anpassung der Kombination zulässt. Die Aufgabe des Autors ist somit darauf beschränkt, die Marker zu bestimmen, die zu einer Kombination zusammengefasst werden sollen.

Das Konzept der Markertupel zielt auf die Wiederverwendung von Markern ab. Das Prinzip der Bereichsunterteilung ermöglicht dabei, gleiche Marker in mehreren Bereichen zu verwenden. Die Verwaltung der Bereiche und deren Marker werden dem Autor dabei abgenommen, wobei eine dynamische Anpassung und Erweiterung ermöglicht wird. Der Autor fordert somit lediglich noch neue Bereiche an, oder fordert neue Marker in einem Bereich an und erhält entsprechend ein Markertupel, das wie eine einfache Trackingquelle vom Autor angewendet werden kann.

Im Rahmen der Realisierung wurde daraufhin beschrieben, wie die einzelnen Konzepte umgesetzt werden können, wobei speziell für die Gütefunktion¹ Messreihen zur Bestimmung der abstands- und orientierungsabhängigen Schwankungen durchgeführt wurden, die zu einer abstands- und orientierungsabhängigen Bewertung von Trackingangaben führte. Diese Realisierbarkeit der Konzepte, wurde durch die Beschreibung der speziellen Implementierung in der AMIRE-Autorenumgebung nochmals unterstrichen. Bei dieser Implementierung wurden alle entwickelten Konzepte umgesetzt und stehen somit in der AMIRE-Autorenumgebung zur Verfügung.

Zum Abschluss der Arbeit wurden die Ergebnisse und die Vorgehensweise rückblickend kritisch betrachtet.

¹Das Konzept der Gütefunktion und deren Realisierung durch die Durchführung und Auswertung dieser Messungen, wurden veröffentlicht und werden auf der ISMAR'04 vorgestellt [ABD04].

8.2 Ausblick

In der Evaluierung der Ergebnisse wurde schon an verschiedenen Stellen auf die Erweiterbarkeit der einzelnen Konzepte hingewiesen. In den Markerkategorien könnten beispielsweise weitere Filterungsverfahren angewendet werden, die eventuell bessere Ergebnisse versprechen, als der verwendete Kalman-Filter. Die Unterteilung der Kategorien selbst könnte den Eigenschaften der Trackingquellen noch präziser angepasst werden, wobei dann auch eine angepasste Hilfestellung zur Kategorisierung benötigt würde, die diese Eigenschaften erkennt. Es wäre auch eine dynamische Anpassung der Zuordnung denkbar, bei dem während des Trackings, die Eigenschaften der Angaben überprüft werden und gegebenenfalls die Kategorie automatisch gewechselt wird.

Die redundante Markerkombination besitzt als zentrales Entscheidungskriterium die Gütefunktion, die mit den Parametern des Abstands des Markers zur Kamera und des Kamerawinkels (siehe [Abbildung 5.4\(b\)](#)) ausgestattet wurde. Allerdings wären an dieser Stelle sicherlich noch weitere Parameter denkbar (wie beispielsweise die vollständige Orientierungsangabe, oder auch die Abhängigkeit vom Markermuster), die auch durch ausführlichere Messungen bestimmt werden könnten. Das Konzept der Gütefunktion könnte auch schon auf der Ebene des Trackingsystems realisiert werden, da solche Informationen über die Güte der Trackingangaben sicherlich auch andere Anwendungen findet. Die Filterung der Trackingangaben könnte beispielsweise mit den Gütewerten arbeiten, um das Wissen über systematische Schwankungen der Messwerte noch umfangreicher einbeziehen zu können.

Bei der Kombination der Trackingangaben innerhalb der Markerkombination, wurde aufgrund des Gütewertes zum einen ein Marker ausgewählt, aus dessen Trackingangaben die Trackinginformationen der Kombination bestimmt wurden, und zum anderen wurden anhand der Gütewerte die einzelnen Trackingangaben gewichtet. An dieser Stelle wäre es auch sinnvoll die Offsets der einzelnen Marker zu dem einheitlichen Koordinatensystem zu berücksichtigen, da diese wie Hebelarme wirken und geringe Schwankungen in den Orientierungsangaben verstärken. Ein Marker, der eine Trackinginformation mit hohem Gütewert bietet, kann beispielsweise durch seinen großen Abstand zu der darzustellenden Geometrie, wesentlich größere Positionierungsschwankungen verursachen, als ein Marker, der über einen geringeren Gütewert verfügt und dabei allerdings einen kleineren Hebelarm zur Geometrie besitzt.

Der Einsatz von Filterungsverfahren innerhalb der Markerkombination wäre auch eine denkbare Erweiterung der Funktionalität der redundanten Markerkombination. Die einzelnen Trackinginformationen der Marker können bereits durch die Markerkategorien gefiltert werden. Es wäre interessant herauszufinden, inwieweit eine zusätzliche Filterung in der Kombination sinnvoll ist, insbesondere, da mit den Offset-Informationen noch weitere Anhaltspunkte gegeben sind, die eine zusätzliche Bewertung der einzelnen Trackingangaben zulassen (weicht die Trackingangabe, in Kombination mit dem Offset, stark von dem einheitlichen Koordinatenursprung ab, oder nicht).

Bei der Wiederverwendung von Markern, in Form von Markertupeln, wäre zu prüfen,

inwieweit die Kombination aus Bereichs- und Positionsmarkern noch erweitert werden könnte. Beispielsweise könnte die Bereichsbestimmung auch anhand eines Markertupels durchgeführt werden. Damit stände mit einer Kombination aus zwei Bereichsmarkern, noch eine größere Anzahl von unterscheidbaren Bereichen zur Verfügung. Insbesondere stößt die Wiederverwendung von Markern an ihre Grenzen, wenn die Unterteilung der Bereiche vom Autor ungeschickt gewählt wurde, so dass beispielsweise in den einzelnen Bereichen lediglich ein oder zwei Positionsmarker zum Einsatz kommen. Eine Funktion die eine Reorganisation der Bereiche durchführt, wäre für den Autor hilfreich.

Prinzipiell ist zu überprüfen, inwieweit die entwickelten Konzepte auf andere Trackingtechnologien anwendbar sind. Das redundante Kombinieren von Trackingquellen ist sicherlich auch auf andere Verfahren, wie beispielsweise der elektromagnetischen Feldmessung, erweiterbar. Dabei stellt sich die Frage, wie die Gütefunktion bei anderen Trackingtechnologien aussehen könnte und von welchen Parametern sie abhängig ist. Die Kategorisierung von Trackingquellen und die entsprechende Filterung der Trackingangaben lassen sich auch auf andere Technologien erweitern, wobei dazu geeignete Kriterien für die Kategorisierung entwickelt werden müssten.

Sicherlich werden auch im Laufe der Zeit die markerlosen Trackingverfahren durch verbesserte Bildanalysemethoden immer bessere Ergebnisse liefern, die dann auch deren Einsatzmöglichkeiten erweitern würden. Solche Verbesserungen in der Bildanalyse hätten allerdings auch Auswirkungen auf das markerbasierte Tracking, da auch dort auf Bildanalysemethoden zurückgegriffen wird. Die markerbasierten Trackingverfahren würden von solchen Entwicklungen ebenso profitieren und scheinen ihren Vorsprung auch in der Zukunft nicht zu verlieren. Das zusätzliche Installieren von Markern ist in manchen Anwendungen sicherlich ein Nachteil, doch ist bei der Mehrzahl der Anwendungen das Tracking auf einen bestimmten Bereich beschränkt, der ohne weitere Probleme mit Markern präpariert werden kann. Die Präparation der Umgebung wird sicherlich in Kauf genommen, wenn dadurch auf exaktere Trackingangaben zurückgegriffen werden kann.

Anhang A

Inhalt der beigefügten DVD

Im Wurzelverzeichnis der beigefügten DVD befindet sich die Diplomarbeit in Druck- und Web-Qualität sowie die Aufgabenstellung und die Zusammenfassung der Arbeit in englischer und deutscher Version im Portable Document Format (PDF). Die weiteren Inhalte sind in folgende Ordner unterteilt:

- **AMIREv1+EnhancedTracking:** Enthält das kompilierte AMIRE-Framework und die implementierten Komponenten. Im Unterverzeichnis **bin** kann mit Hilfe der Batch-Dateien **MarkerArray_demo.bat** und **AreaManagement_demo.bat** verschiedene Beispielszenen gestartet werden, die zum einen den Einsatz der Markerkombination zeigt, die zur Darstellung von virtuellen Geometrien genutzt wird, und zum anderen den Einsatz von Markertupeln demonstriert.
- **sources:** Enthält zusätzlich den Quellcode der implementierten Komponenten und die entsprechenden Microsoft Visual Studio Solution- und Projektdateien. Diese können in ein eventuell schon installiertes AMIRE-Verzeichnis kopiert werden und anschließend kompiliert werden. Somit stehen dann auch die implementierten Komponenten in Form einer DLL-Datei zur Verfügung.
- **latex:** Enthält die \LaTeX Quelldateien, die zur Erstellung dieser Arbeit verwendet wurden. Außerdem sind alle erstellten Grafiken und Tabellen darin enthalten.
- **measurement:** Enthält die Auswertung der durchgeführten Messreihen, zur Bestimmung der Gütefunktion, in Form einer Microsoft Excel-Datei (inklusive den dazu benötigten Funktionsmakros) und einer gepackten Version der eigentlichen Messwerte (Sammlung von Textdateien).

Quellenverzeichnis

- [ABD04] ABAWI, DANIEL F., JOACHIM BIENWALD und RALF DÖRNER: *Accuracy in Optical Tracking with Fiducial Markers: An Accuracy Function for ARToolKit*. In: *IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'04)*. IEEE and ACM Press, 2004. akzeptiert zur Veröffentlichung. (Zitiert auf den Seiten 81 und 132.)
- [ABF⁺94] ASTHEIMER, P., K. BÖHM, W. FELGER, M. GÖBEL und S. MÜLLER: *Die Virtuelle Umgebung: eine neue Epoche in der Mensch-Maschine-Kommunikation, Teil I: Einordnung, Begriffe und Geräte*. Informatik Spektrum, 17:281–290, 1994. (Zitiert auf Seite 5.)
- [AD04] ABAWI, DANIEL F. und RALF DÖRNER: *Creating Mixed Reality Content: Problems, Concepts and Solutions*. In: *Proceedings of the Computer Graphics International 2004 Conference (CGI 2004)*, Seiten 444–451. IEEE Press, 2004. (Zitiert auf den Seiten xviii, 47, 48, 50, 51 und 107.)
- [ADG⁺02] ABAWI, DANIEL F., RALF DÖRNER, CHRISTIAN GEIGER, PAUL GRIMM, MICHAEL HALLER, WERNER HARTMANN, SILVAN REINHOLD und JÜRGEN ZAUNER: *Mixed Reality - A Source for New Authoring Methodologies?* In: *ACM SIGGRAPH and Eurographics Campfire: Workshop Proceedings Production Process of 3D Computer Graphics Applications - Structures, Roles and Tools*, Seiten 9–16. ACM Press, Juni 2002. (Zitiert auf den Seiten 51 und 107.)
- [ADHZ04] ABAWI, DANIEL F., RALF DÖRNER, MICHAEL HALLER und JÜRGEN ZAUNER: *Efficient Mixed Reality Application Development*. In: *Proceedings of the 1st Conference on Visual Media Production (CVMP)*, Seiten 289–294. IEE, 2004. (Zitiert auf den Seiten xviii, 47, 48, 49, 50, 51 und 107.)
- [AHNS99] AZUMA, RONALD, BRUCE HOFF, HOWARD NEELY und RON SARFATY: *A Motion-Stabilized Outdoor Augmented Reality System*. In: *Proceedings of IEEE Virtual Reality '99*, Seiten 252–259. IEEE Computer Society Press, 1999. (Zitiert auf den Seiten 32 und 46.)
- [AMI04a] AMIRE: *AMIRE – Specification of the MR framework*. Deliverable D5.2, Mai 2004. <http://webster.fh-hagenberg.at/amire/development/>

- documents/D5.2.pdf, letzter Zugriff September 2004. (Zitiert auf den Seiten [xvii](#), [xviii](#), [xix](#), [28](#), [51](#), [109](#), [111](#) und [112](#).)
- [AMI04b] *Offizielle AMIRE Webseite (Authoring Mixed Reality)*, letzter Zugriff September 2004. <http://www.amire.net>. (Zitiert auf den Seiten [51](#) und [107](#).)
- [ARC04] *Offizielle ARCHEOGUIDE Webseite (Augmented Reality-based Cultural Heritage On-site Guide)*, letzter Zugriff Juli 2004. <http://archeoguide.intranet.gr>. (Zitiert auf den Seiten [xvii](#), [9](#), [11](#), [30](#) und [51](#).)
- [ART04] *ART.LIVE Webseite (ARchitecture and authoring Tools prototype for Living Images and new Video Experiments)*, letzter Zugriff August 2004. <http://www.tele.ucl.ac.be/PROJECTS/art.live/>. (Zitiert auf den Seiten [9](#) und [50](#).)
- [ARV04] *Offizielle ARVIKA Webseite*, letzter Zugriff Juli 2004. <http://www.arvika.de>. (Zitiert auf den Seiten [6](#), [42](#) und [50](#).)
- [Azu97] AZUMA, RONALD: *A Survey of Augmented Reality*. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 6(4):355–385, August 1997. (Zitiert auf den Seiten [xvii](#), [6](#), [16](#), [17](#) und [18](#).)
- [Bal00] BALZERT, HELMUT: *Lehrbuch der Software-Technik – Software-Entwicklung*. Spektrum Akademischer Verlag, 2000. (Zitiert auf den Seiten [48](#) und [109](#).)
- [BAY04] *Webseite der Open Source Bayesian Filtering Classes*, letzter Zugriff September 2004. <http://bayesclasses.sourceforge.net/Bayes++.html>. (Zitiert auf Seite [116](#).)
- [BBK⁺01] BAUER, MARTIN, BERND BRUEGGE, GUDRUN KLINKER, ASA MACWILLIAMS, THOMAS REICHER, STEFAN RISS, CHRISTIAN SANDOR und MARTIN WAGNER: *An authoring toolkit for mixed reality experiences*. In: *In Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR'01)*, Seite 45. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, Oktober 2001. (Zitiert auf Seite [12](#).)
- [BCC90] BROIDA, TED J., S. CHANDRASHEKHAR und RAMA CHELLAPPA: *Recursive 3-D Motion Estimation from Monocular Image Sequence*. In: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 26, No. 4, Seiten 639–655. IEEE Computer Society Press, 1990. (Zitiert auf Seite [54](#).)
- [BNR02] BARATOFF, GREGORY, ALEXANDER NEUBECK und HOLGER REGENBRECHT: *Interactive Multi-Marker Calibration for Augmented Reality Applications*. In: *Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'02)*, Seiten 107–116. IEEE Computer Society Press, 2002. (Zitiert auf Seite [40](#).)

- [CCP02] CHIA, KAR WEE, ADRIAN DAVID CHEOK und SIMON J.D. PRINCE: *Online 6 DOF Augmented Reality Registration from Natural Features*. In: *Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'02)*, Seite 305. IEEE Computer Society Press, 2002. (Zitiert auf den Seiten [xvii](#), [30](#) und [31](#).)
- [CHA04] *Offizielle CHARISMATIC Webseite*, letzter Zugriff August 2004. <http://www.charismatic-project.com/>. (Zitiert auf den Seiten [10](#) und [50](#).)
- [CNSD93] CRUZ-NEIRA, CAROLINA, DANIEL J. SANDIN und THOMAS A. DEFANTI: *Surround-screen projection-based virtual reality: the design and implementation of the CAVE*. In: *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, Seiten 135–142. ACM Press, 1993. (Zitiert auf Seite [23](#).)
- [CRE04] *CREATE Webseite (Constructivist Mixed Reality for design, education, and cultural heritage)*, letzter Zugriff August 2004. <http://www.cs.ucl.ac.uk/research/vr/Projects/Create/>. (Zitiert auf den Seiten [xvii](#), [10](#), [12](#) und [51](#).)
- [DCR03] DAVIS, LARRY, ERIC CLARKSON und JANNICK P. ROLLAND: *Predicting Accuracy in Pose Estimation for Marker-based Tracking*. In: *Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'03)*, Seiten 28–35. IEEE Computer Society Press, 2003. (Zitiert auf Seite [58](#).)
- [DGHP03] DÖRNER, RALF, CHRISTIAN GEIGER, MICHAEL HALLER und VOLKER PAELKE: *Authoring mixed reality - a component and framework-based approach*. In: *Entertainment Computing: Technologies and Applications, IFIP First International Workshop on Entertainment Computing (IWEC 2002)*, Band 240 der Reihe *IFIP Conference Proceedings*, Seiten 405–413. Kluwer, Mai 2003. (Zitiert auf den Seiten [50](#), [51](#), [107](#) und [109](#).)
- [dIMH02] IPIÑA, DIEGO LÓPEZ DE, PAULO MENDONÇA und ANDY HOPPER: *TRIP: a Low-Cost Vision-Based Location System for Ubiquitous Computing*, Band 6 der Reihe *3. Personal and Ubiquitous Computing*, may 2002. (Zitiert auf den Seiten [109](#) und [110](#).)
- [DWA04] *Offizielle DWARF Webseite (Distributed Wearable Augmented Reality Framework)*, letzter Zugriff August 2004. <http://www.bruegge.in.tum.de/DWARF/>. (Zitiert auf den Seiten [xvii](#), [12](#), [14](#) und [50](#).)
- [ESK96] ENCARNACÃO, JOSÉ, WOLFGANG STRASSER und REINHARD KLEIN: *Graphische Datenverarbeitung 1 – Gerätetechnik, Programmierung und Anwendung graphischer Systeme*. R. Oldenbourg Verlag, München, 4. Auflage, 1996. (Zitiert auf den Seiten [18](#) und [76](#).)

- [ESK97] ENCARNACÃO, JOSÉ, WOLFGANG STRASSER und REINHARD KLEIN: *Graphische Datenverarbeitung 2 – Modellierung komplexer Objekte und photorealistischer Bilderzeugung*. R. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 4. Auflage, 1997. (Zitiert auf Seite 18.)
- [FHP98] FOXLIN, ERIC, MICHAEL HARRINGTON und GEORGE PFEIFER: *Constellation: a wide-range wireless motion-tracking system for augmented reality and virtual set applications*. In: *Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, Seiten 371–378. ACM Press, 1998. (Zitiert auf den Seiten xvii, 25, 26 und 46.)
- [FMHW97] FEINER, STEVEN, BLAIR MACINTYRE, TOBIAS HÖLLERER und ANTHONY WEBSTER: *A Touring Machine: Prototyping 3D Mobile Augmented Reality Systems for Exploring the Urban Environment*. In: *Proceedings of the 1st IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC '97)*, Seiten 208–217, Oktober 1997. (Zitiert auf Seite 13.)
- [FN03] FOXLIN, ERIC und LEONID NAIMARK: *VIS-Tracker: A Wearable Vision-Inertial Self-Tracker*. In: *Proceedings of IEEE Virtual Reality Conference 2003 (VR 2003)*, Seiten 199–206. IEEE Computer Society Press, 2003. (Zitiert auf Seite 60.)
- [Fri00] FRIEDRICH, WOLFGANG: *ARVIKA Augmented Reality for Development, Production and Service*. In: *Tagungsband des Informationsforum Virtuelle Produktentstehung (IVIP)*, Mai 2000. (Zitiert auf Seite 6.)
- [FSP99] FUHRMANN, ANTON, DIETER SCHMALSTIEG und WERNER PURGATHOFER: *Fast calibration for augmented reality*. In: *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, Seiten 166–167. ACM Press, 1999. (Zitiert auf Seite 28.)
- [GGG90] GOBRECHT, HEINRICH, JÜRGEN H. GOBRECHT und KLAUS H. GOBRECHT: *Bergmann Schaefer – Lehrbuch der Experimentalphysik*, Band 1 Mechanik, Akustik, Wärme. Walter de Gruyter & Co., 1990. (Zitiert auf den Seiten xvii und 27.)
- [GHPR02] GRIMM, PAUL, MICHAEL HALLER, VOLKER PAELKE und SILVAN REINHOLD: *AMIRE - Authoring Mixed Reality*. In: *Proceedings of the First IEEE International Workshop on ARToolKit (ART02)*. IEEE Computer Society Press, September 2002. (Zitiert auf den Seiten xviii, 51, 107 und 108.)
- [HFT⁺99] HÖLLERER, T., S. FEINER, T. TERAUCHI, G. RASHID und D. HALLAWAY: *Exploring MARS: Developing Indoor and Outdoor User Interfaces to a Mobile Augmented Reality System*. In: *Proceedings of Computers and Graphics*, Seiten 779–785. Elsevier Publishers, Dezember 1999. (Zitiert auf Seite 13.)

- [HR02] HARINGER, MATTHIAS und HOLGER T. REGENBRECHT: *A pragmatic approach to Augmented Reality Authoring*. In: *Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'02)*. IEEE Computer Society, 2002. (Zitiert auf den Seiten [xvii](#), [12](#) und [13](#).)
- [INT04] Offizielle INTERFACE Webseite, letzter Zugriff August 2004. <http://www.ist-interface.org/>. (Zitiert auf den Seiten [10](#) und [50](#).)
- [JU97] JULIER, SIMON J. und JEFFREY K. UHLMANN: *A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems*. In: *Proceedings of AeroSense: The 11th International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls*, 1997. (Zitiert auf den Seiten [46](#) und [54](#).)
- [KB99] KATO, HIROKAZU und MARK BILLINGHURST: *Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-Based Augmented Reality Conferencing System*. In: *Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality*, Seite 85. IEEE Computer Society, 1999. (Zitiert auf den Seiten [xviii](#), [40](#) und [41](#).)
- [KBP00a] KATO, HIROKAZU, MARK BILLINGHURST und IVAN POUPYREV: *AR-Toolkit (version 2.33)*. Technischer Bericht, Hiroshima City University, November 2000. <http://www.hitl.washington.edu/people/grof/SharedSpace/Download/ARToolKit2.33doc.pdf>, letzter Zugriff Juli 2004. (Zitiert auf den Seiten [30](#), [43](#), [59](#), [69](#), [92](#), [109](#) und [110](#).)
- [KBP⁺00b] KATO, HIROKAZU, MARK BILLINGHURST, IVAN POUPYREV, K. IMAMOTO und K. TACHIBANA: *Virtual Object Manipulation on a Table-Top AR Environment*. In: *Proceedings of the International Symposium on Augmented Reality (ISAR 2000)*, Seiten 111–119, Oktober 2000. (Zitiert auf den Seiten [xvii](#), [xviii](#), [29](#), [39](#) und [41](#).)
- [KCD⁺01] KLINKER, GUDRUN, OLIVER CREIGHTON, ALLEN DUTOIT, RAFAEL KOBYLINSKI, CHRISTOPH VILSMEIER und BERND BRUEGGE: *Augmented maintenance of powerplants: A prototyping case study of a mobile AR system*. In: *Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR 2001)*, Oktober 2001. (Zitiert auf Seite [13](#).)
- [KKR⁺97] KOLLER, DIETER, GUDRUN KLINKER, ERIC ROSE, DAVID BREEN, ROSS WHITAKER und MIHRAN TUCERYAN: *Real-time vision-based camera tracking for augmented reality applications*. In: *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, Seiten 87–94. ACM Press, 1997. (Zitiert auf den Seiten [46](#) und [53](#).)
- [KLK⁺02] KALKUSCH, MICHAEL, THOMAS LIDY, MICHAEL KNAPP, GERHARD REITMAYR, HANNES KAUFMANN und DIETER SCHMALSTIEG: *Structured Visual Markers for Indoor Pathfinding*. In: *Proceedings of the First IEEE*

- International Workshop on ARToolKit (ART02)*. IEEE Computer Society Press, 2002. (Zitiert auf den Seiten 43 und 44.)
- [LaV03a] LAVIOLA, JOSEPH J.: *A Comparison of Unscented and Extended Kalman Filtering for Estimating Quaternion Motion*. In: *Proceedings of the 2003 American Control Conference*, Seiten 2435–2440. IEEE Press, 2003. (Zitiert auf Seite 46.)
- [LaV03b] LAVIOLA, JOSEPH J.: *Double exponential smoothing: an alternative to Kalman filter-based predictive tracking*. In: *Proceedings of the workshop on Virtual environments 2003*, Seiten 199–206. ACM Press, 2003. (Zitiert auf den Seiten 47 und 54.)
- [LIF04] *LIFEPLUS Webseite*, letzter Zugriff August 2004. www.miralab.unige.ch/subpages/lifeplus. (Zitiert auf den Seiten xvii, 9, 10 und 51.)
- [LRS02] LEDERMANN, FLORIAN, GERHARD REITMAYR und DIETER SCHMALSTIEG: *Dynamically Shared Optical Tracking*. In: *Proceedings of the First IEEE International Workshop on ARToolKit (ART02)*, Seiten 17–24. IEEE Computer Society Press, 2002. (Zitiert auf den Seiten xviii, 40 und 42.)
- [LWR⁺03] LOSCOS, CÉLINE, HILA RITTER WIDENFELD, MARIA ROUSSOU, ALEXANDRE MEYER, FRANCO TECCHIA, GEORGE DRETTAKIS, EMMANUEL GALLO, ALEX RECHE MARTINEZ, NICOLAS TSINGOS, YIORGOS CHRYSANTHOU, LUC ROBERT, MASSIMO BERGAMASCO, ANDREA DETTORI, und SOUHEIL SOUBRA: *The CREATE Project: Mixed Reality for Design, Education, and Cultural Heritage with a Constructivist Approach*. In: *Proceedings the Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'03)*. IEEE Computer Society, 2003. (Zitiert auf den Seiten 10 und 12.)
- [LZ02] LI, VALERIE PEIHUA und TIANWEN ZHANG: *Calibration for augmented reality experimental testbeds*. In: *Proceedings of the Image and Vision Computing, Volume 22, Number 2*, Seiten 157–164, Februar 2002. (Zitiert auf den Seiten 28 und 54.)
- [MAR04] *Offizielle MARS Webseite (Mobile Augmented Reality Systems)*, letzter Zugriff August 2004. <http://www.cs.columbia.edu/graphics/projects/mars/>. (Zitiert auf den Seiten xvii, 13, 14 und 15.)
- [MC00] MACINTYRE, BLAIR und ENYLTON MACHADO COELHO: *Adapting to dynamic registration errors using level of error (LOV) filtering*. In: *Proceedings of ISAR'00 (International Symposium on Augmented Reality)*, Seiten 85–88. IEEE and ACM Press, 2000. (Zitiert auf Seite 54.)

- [MED04] Offizielle MEDARPA (*Medical Augmented Reality for Patients*) Webseite, letzter Zugriff August 2004. <http://www.medarpa.de>. (Zitiert auf den Seiten xvii, 7, 8 und 18.)
- [Men00] MENACHE, ALBERTO: *Understanding Motion Capture for Computer Animation and Video Games*. Morgan Kaufmann Publishers (Academic Press), 2000. (Zitiert auf Seite 22.)
- [MET04] Offizielle METAVISION Webseite, letzter Zugriff August 2004. <http://www.ist-metavision.com/>. (Zitiert auf den Seiten xvii, 8, 9 und 50.)
- [MH99] MÖLLER, TOMAS und ERIC HAINES: *Real-Time Rendering*, Kapitel 3.3 Quaternions, Seite 42. AK Peters, Natick, Massachusetts, United Staats, 1999. (Zitiert auf Seite 76.)
- [Mie04] MIEDE, ANDRÉ: *Analyse und Konzeption von Verhaltensbausteinen für komponentenbasierte Mixed Reality-Applikationen*. Diplomarbeit, Fachhochschule Osnabrück, Juli 2004. (Zitiert auf Seite 51.)
- [MK94] MILGRAM, PAUL und FUMIO KISHINO: *A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays*. IEICE Trans. Information Systems, E77-D(12):1321–1329, 1994. (Zitiert auf den Seiten xvii und 5.)
- [Mor92] MORRISON, JACK: *Graphics Gems III*, Kapitel 3.1 Quaternion Interpolation With Extra Spins, Seite 96. California Institute of Technology, Computer Graphics Laboratory, Pasadena California, 1992. (Zitiert auf Seite 76.)
- [MPT02] MALBEZIN, PIERRE, WAYNE PIEKARSKI und BRUCE H. THOMAS: *Measuring ARToolKit Accuracy in Long Distance Tracking Experiments*. In: *Proceedings of ART02, 1st International Augmented Reality Toolkit Workshop*. IEEE Computer Society Press, 2002. (Zitiert auf den Seiten 30, 58, 60 und 81.)
- [NYC⁺99] NEUMANN, ULRICH, SUYA YOU, YOUNGKWAN CHO, JONGWEON LEE und JUN PARK: *Augmented reality tracking in natural environments*, 1999. (Zitiert auf den Seiten xvii, 28, 29, 30, 32 und 37.)
- [OPE04] *OpenCV* Webseite, letzter Zugriff September 2004. <http://www.intel.com/research/mrl/research/opencv/>. (Zitiert auf Seite 110.)
- [OXM02] OWEN, CHARLES B., FAN XIAO und PAUL MIDDLEIN: *What Is The Best Fiducial?* In: *Proceedings of the First IEEE International Workshop on ARToolKit (ART02)*, Seiten 98–105. IEEE Computer Society Press, 2002. (Zitiert auf den Seiten 36, 43 und 69.)
- [PIS04] Offizielle PISTE Webseite (*Personalized Immersive Sports TV Experience*), letzter Zugriff August 2004. <http://piste.intranet.gr/>. (Zitiert auf den Seiten xvii, 7, 8 und 50.)

- [PT03] PIEKARSKI, WAYNE und BRUCE THOMAS: *An Object-Oriented Software Architecture for 3D Mixed Reality Applications*. In: KAWADA, STEPHANIE (Herausgeber): *The Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Seiten 247–256, Tokyo, Japan, 2003. IEEE Computer Society. (Zitiert auf Seite 50.)
- [RA00] REKIMOTO, JUN und YUJI AYATSUKA: *CyberCode: Designing Augmented Reality Environments with Visual Tags*. In: *Proceedings of DARE 2000 on Designing augmented reality environments*, Seiten 1–10. ACM Press, 2000. (Zitiert auf den Seiten xvii, 18 und 30.)
- [RDB01] ROLLAND, J. P., L. D. DAVIS und Y. BAILLOT: *A Survey of Tracking Technologies for Virtual Environments*. Lawrence Erlbaum, 2001. (Zitiert auf den Seiten 24, 25 und 27.)
- [RS01a] REITMAYR, GERHARD und DIETER SCHMALSTIEG: *An open software architecture for virtual reality interaction*. In: *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology VRST'01*, Seiten 47–54. ACM Press, 2001. (Zitiert auf Seite 32.)
- [RS01b] REITMAYR, GERHARD und DIETER SCHMALSTIEG: *OpenTracker – An Open Software Architecture for Reconfigurable Tracking Based on XML*. In: *VR*, Seiten 285–286, 2001. (Zitiert auf Seite 32.)
- [RS03] REITMAYR, GERHARD und DIETER SCHMALSTIEG: *Location based applications for mobile augmented reality*. In: *Proceedings of the Fourth Australian user interface conference on User interfaces 2003*, Seiten 65–73. Australian Computer Society, Inc., 2003. (Zitiert auf Seite 32.)
- [Sho85] SHOEMAKE, KEN: *Animating rotation with quaternion curves*. In: *Proceedings of the 12th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, Seiten 245–254. ACM Press, 1985. (Zitiert auf Seite 76.)
- [STA04a] *Offizielle STAR Webseite (Service Training through Augmented Reality)*, letzter Zugriff August 2004. www.realviz.com/STAR. (Zitiert auf den Seiten 7 und 50.)
- [STA04b] *Offizielle STARMATE Webseite (System using Augmented Reality for Maintenance, Assembly, Training and Education)*, letzter Zugriff August 2004. <http://starmate.iff-upl.fhg.de>. (Zitiert auf den Seiten 7 und 50.)
- [STA04c] *STARS Webseite*, letzter Zugriff August 2004. <http://www.bruegge.in.tum.de/DWARF/ProjectStars>. (Zitiert auf Seite 13.)

- [Str01] STRICKER, DIDIER: *Tracking with reference images: a real-time and markerless tracking solution for out-door augmented reality applications*. In: *Proceedings of the 2001 conference on Virtual reality, archeology, and cultural heritage*, Seiten 77–82. ACM Press, 2001. (Zitiert auf den Seiten [xvii](#), [30](#) und [31](#).)
- [Stu04] *Offizielle Studierstube Webseite*, letzter Zugriff August 2004. <http://www.studierstube.org/>. (Zitiert auf Seite [50](#).)
- [Tip98] TIPLER, PAUL A.: *Physik*. Spektrum Akademischer Verlag, 1998. (Zitiert auf Seite [27](#).)
- [Vin98] VINCE, JOHN: *Essential Virtual Reality fast – How to Understand the Techniques and Potential of Virtual Reality*. Springer-Verlag, 1998. (Zitiert auf den Seiten [22](#), [23](#) und [25](#).)
- [VKT⁺01] VLAHAKIS, VASSILIOS, JOHN KARIGIANNIS, MANOLIS TSOTROS, MICHAEL GOUNARIS, LUIS ALMEIDA, DIDIER STRICKER, TIM GLEUE, IOANNIS T. CHRISTOU, RENZO CARLUCCI und NIKOS IOANNIDIS: *Archeoguide: first results of an augmented reality, mobile computing system in cultural heritage sites*. In: *Proceedings of the 2001 conference on Virtual reality, archeology, and cultural heritage*, Seiten 131–140. ACM Press, 2001. (Zitiert auf Seite [9](#).)
- [VRS04] *Offizielle VRSUR Webseite (Virtual Reality Surgery Training System)*, letzter Zugriff August 2004. <http://hiperttn.upv.es/vrsur>. (Zitiert auf den Seiten [7](#), [16](#) und [50](#).)
- [WB97] WELCH, GREG und GARY BISHOP: *An Introduction to the Kalman Filter*. Technischer Bericht, Department of Computer Science, 1997. (Zitiert auf den Seiten [44](#), [45](#) und [77](#).)
- [WvdM00] WAN, ERIC A. und RUDOLPH VAN DER MERWE: *The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation*. In: *Proceedings of Symposium 2000 on Adaptive Systems for Signal Processing, Communication and Control(AS-SPCC)*. IEEE Press, 2000. (Zitiert auf den Seiten [46](#) und [54](#).)
- [Zan01] ZANDT, JAMES R. VAN: *A more robust unscented transform*. In: *Proceedings of SPIE Volume 4473*. SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2001. (Zitiert auf Seite [54](#).)
- [ZFN02] ZHANG, XIANG, STEPHAN FRONZ und NASSIR NAVAB: *Visual Marker Detection and Decoding in AR Systems: A Comparative Study*. In: *Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'02)*, Seite 97. IEEE Computer Society Press, 2002. (Zitiert auf den Seiten [42](#) und [43](#).)